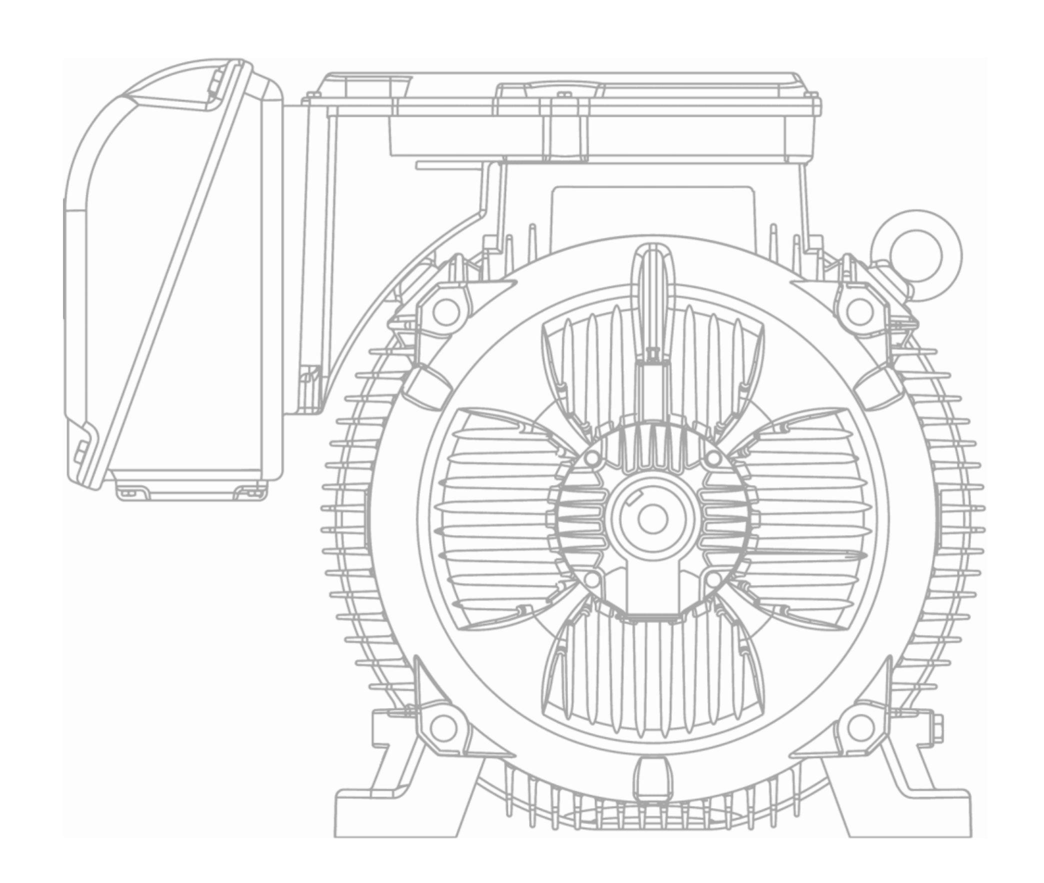
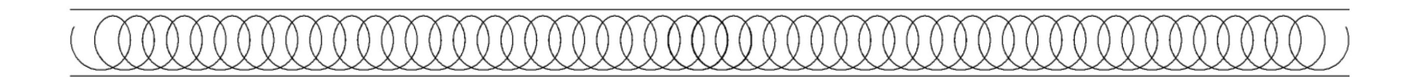
Колосков Ю. В.

ПОСОБИЕ
ПО РАСЧЕТУ ОБМОТКИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ РЕМОНТЕ





Rev. 01 28 April 2025

Пособие предназначено для подготовленного читателя, для квалифицированных обмотчиков – практиков, мастеров, инженеров занятых на производстве ремонта электродвигателей. В пособии предлагается восстановление данных обмотки трехфазного двигателя общепромышленного применения с утраченной обмоткой или с обмоткой или паспортными данными вызывающие сомнение. Приведены примеры, пояснения и порядок расчета для асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором общепромышленного применения мощностью примерно до 100 *квт*. В пособии приводится порядок построения всыпной распределенной обмотки, только в той степени в которой необходимо для приведенных примеров. Для более подробных знаний следует обращаться к литературе в конце, где указаны другие полезные источники для желающих повысить свою квалификацию в области ремонта, конструирования, расчета электродвигателей.

Колосков Юрий Валерьевич

1. Введение.

Основой расчета в пособии является литература [3, 8, 9, 32] предназначенная для высших учебных заведений в которой приводится конструирование электродвигателя по требованиям к электрической машине, по техническому заданию. При ремонте, когда электродвигатель находится на верстаке у обмотчика, в повторении полного расчета нет необходимости. Электродвигатель уже был рассчитан и сделан по общеизвестным методикам. При восстановлении обмотки расчетом необходимо применить те же правила которые применялись при создании электродвигателя. Полный расчет электродвигателя сложен. Однако имея в ремонте уже готовый электродвигатель, как будет показано далее, применяя не сложные математические уравнения вполне доступно полностью восстановить данные обмотки, сделать проверку или даже улучшить, достигнув более лучших показателей, например снизить нагрев электродвигателя при работе. Не смотря на уже имеющиеся подобные публикации по расчету обмотки при ремонте в этом пособии не применяется упрощенный расчет, не используются усредненные значения некоторых значений и коэффициентов. Так как при большом разнообразии серий электродвигателей автор считает что расчет приближенный к достоверности по каким либо упрощенным методикам, таблицам, распространяемых энтузиастами не возможен, и без понимания значений ошибочен. Для достижения результата восстановления обмотки предполагается что механическая часть электродвигателя исправна, сталь статора, посадочные места крышек и подшипников в удовлетворительном состоянии, воздушный зазор между ротором и статором в пределах допусков, исправен ротор.

2. Основные положения.

Тщательный обмер размеров стали статора и свободное сечение просвета паза являются основой расчета. Объем стали статора соответствует возможной мощности электродвигателя. По расчетному заполнению паза проводниками определяется окончательная возможная мощность, так как условная цифра фактора нагрева находится в зависимости от плотности тока в обмотке, которая в свою очередь зависит от возможного максимального заполнения паза медью.

Примеры расчета даны для общепромышленных электродвигателей класса защиты IP44 – 54, длительного режима работы (S1), как наиболее распространенных серийных электродвигателей, то есть полностью закрытых с внешним обдувом вентилятором на валу. В конце пособия приведена полезная литература со ссылками для скачивания. В том числе полные справочные материалы с данными серий электродвигателей 4А, АИР [42, 43, 44, 45], серий электродвигателей производства Китая, справка по обмоточным круглым проводам.

3. Приближенное определение мощности по размеру статора.

Оценка мощности не известного двигателя без паспорта необходима, так как предполагаемые значения *кпд* и *cosφ* не рассчитываются, а подставляются в расчет по предполагаемой мощности. Окончательная оценка мощности происходит, как показано в примерах, при окончании расчета.

В начале эры асинхронных двигателей в начале XX века, нижеприведенная формула предложена немецким инженером Арнольдом, так как из множеств различных допущений и конструкций первых асинхронных моторов инженерам–конструкторам надо было на что–то опираться при расчетах. На сегодняшний день нет единого подхода к выбору главных размеров, электрическая машина может быть сконструирована большого диаметра с малой длиной и на оборот с малым диаметром и большой длиной. Формула является приближенной и подходит только к электромоторам общего применения. Например, к расчету двигателя кратковременного режима работы или длинного с малым диаметром статора интенсивно охлаждаемым водой скважинного погружного насоса она не подойдет. Однако если у вас в руках статор обычного, не специального какого–либо двигателя, то конструктор, создавший его с большой вероятностью, ориентировался на формулу Арнольда, в которой существует зависимость мощности от диаметра, длины статора и количества оборотов.

Ниже приводится методика предварительной оценки мощности закрытого, IP 44–55, асинхронного двигателя до 100 *кВт* обдуваемого вентилятором на валу продолжительного режима работы (S1) с короткозамкнутым ротором, класс изоляции F, при отсутствии паспорта и данных на ремонтируемый двигатель. График составлен составлен на основе 2579 двигателей от 0,06 до 110 *кВт* общего применения.

При оценке предварительной мощности в данном документе не используется внешний диаметр статора. При дальнейшем расчете мощность может оказаться заметно иной, чем начальная оценка.

Для приближенной оценки мощности мотора по размеру статора возможно определить по значению *постоянной К*, на рис. 1, зависящей от длины статора, диаметра расточки, количества оборотов. Эта оценка является предварительной для определения значений параметров вносимых в расчет, таких как например индукция в статоре, в воздушном зазоре при расчете обмотки на имеющемся статоре. В последующем окончательная мощность уточняется при дальнейшем расчете. Здесь под слово "*постоянной*" имеется ввиду некоторое значение, которое обозначим буквой "*К*".

Формула для подсчета:

$$P\text{кВт} = \frac{K \times Di^2 \times L \times n}{10^6}$$

где: *P*кВт – мощность на валу, *К* – значение, найденное по таблице в зависимости от размера полюсного деления и количества полюсов мотора, Di^2 – внутренний диаметр статора, возведенный в степень 2 (в квадрате), в *см*., *L* – длина статора, в *см*., *n* – синхронная скорость вращения, *об. мин*.

Полюсное деление статора, длина части окружности внутреннего диаметра статора занимаемой полюсом:

$$\tau = \frac{\pi \times Di}{2p}$$

τ – полюсное деление по окружности расточки статора, часть длины окружности занимаемой одним полюсом, в *см*., *Di* – внутренний диаметр, в *см*., $2p$ – количество полюсов, π – число "пи" (3,14159, ≈ 3,14).

Обратите внимание, для удобства размещения линий на рисунке здесь применяются размеры в сантиметрах.

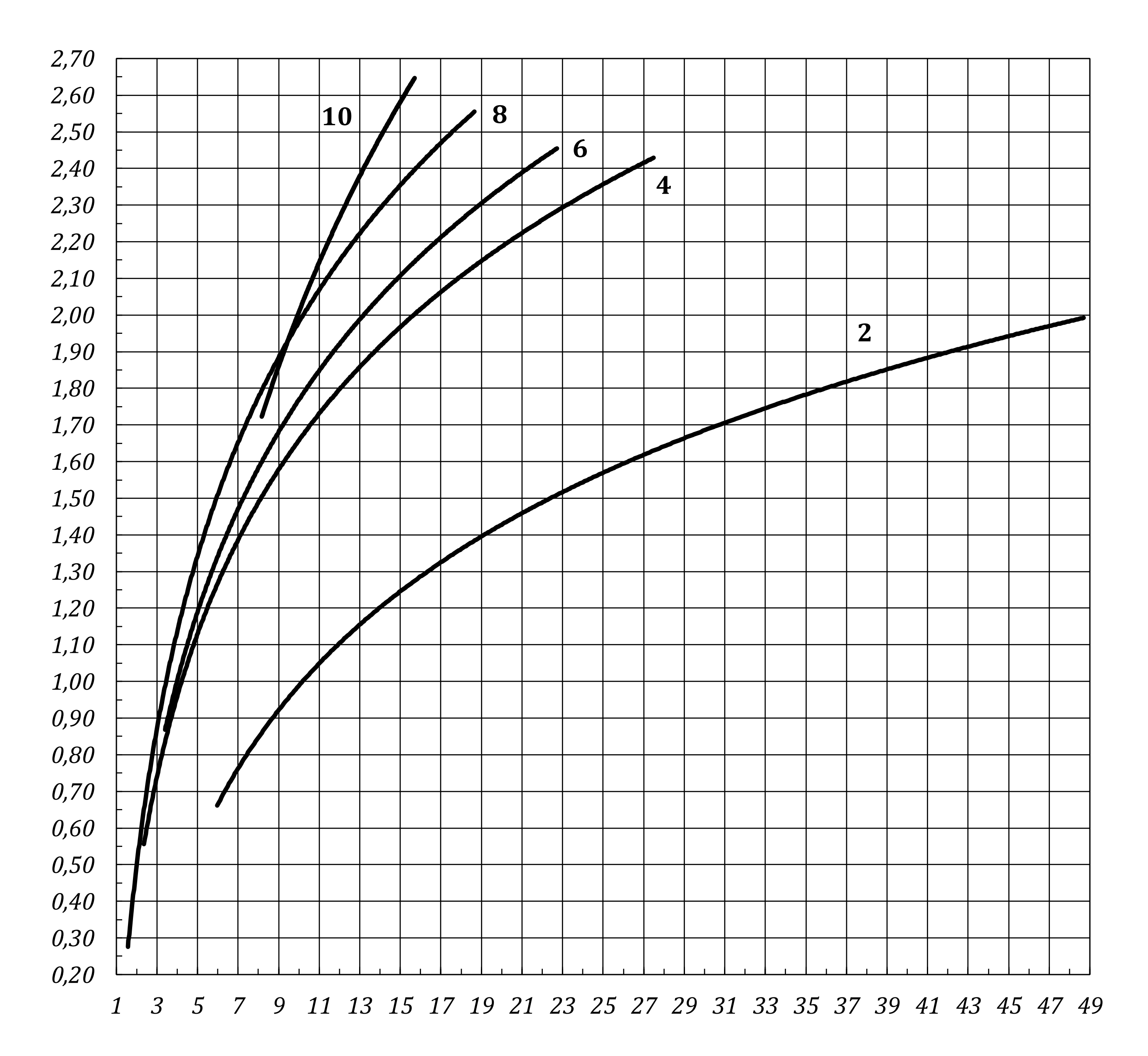


Рис. 1. К определению приближенной мощности.
Вертикальная ось – коэффициент *К*, внизу, горизонтальная ось – полюсное деление в сантиметрах, цифра рядом с линией указывает количество полюсов.

Пример. Определить мощность на валу электродвигателя по данным сердечника:

Di = 26,5 *см*., *L* = 17 *см*., *n* = 1500 *об. мин*. (синхронная скорость)

Решение.

Число полюсов машины 2*p*:

$$2p = \frac{120 \times f}{n} = \frac{6000}{1500} = 4 \text{ полюса}$$

где *f* – частота сети питания (50 *гц.*), *n* – количество оборотов в минуту, синхронных.

Полюсное деление машины:

$$\tau = \frac{\pi \times Di}{2p} = \frac{3{,}14 \times 26{,}5}{4} = 20{,}8 \text{ см.}$$

На рисунке на нижней линии находим значение полюсного деления 20,8 *см*., далее проведя воображаемую линию вверх, до пересечения с кривой линией, соответствующей количеству полюсов, в левой части на вертикальной линии находим подходящий коэффициент *К*.

при $2p = 4$ и $\tau = 20{,}8$ *см*. примем по рисунку 1 $K \approx 2{,}20$

Приближенно мощность на валу машины, в *кВт*:

$$P = \frac{K \times Di^2 \times L \times n}{10^6} = \frac{2{,}20 \times 26{,}5^2 \times 17 \times 1500}{1000000} = \frac{2{,}20 \times 702{,}25 \times 17 \times 1500}{1000000} \approx 39{,}4 \text{ кВт.}$$

Пример. Определить мощность на валу электродвигателя по данным сердечника:

$Di = 15{,}8$ *см*., $L = 16$ *см*., $n = 1000$ *об. мин*.

Решение.
Число полюсов машины:

$$2p = \frac{120 \times f}{n} = \frac{6000}{1000} = 6$$

Полюсное деление машины:

$$\tau = \frac{\pi \times Di}{2p} = \frac{3{,}14 \times 15{,}8}{6} = 8{,}27 \text{ см.}$$

По данным рисунка:

при $2p = 6$ и $\tau = 8{,}27$ *см*., примем $K \approx 1{,}6$

Приближенная мощность машины на валу:

$$P = \frac{K \times Di^2 \times L \times n}{10^6} = \frac{1{,}6 \times 15{,}8^2 \times 16 \times 1000}{1000000} = \frac{1{,}6 \times 249{,}64 \times 16 \times 1000}{1000000} \approx 6{,}4 \text{ кВт.}$$

Обратите внимание, итоговая цифра – это приблизительная мощность на валу двигателя. То есть та мощность, которая указывается в документации на двигатель и в паспорте прикрепляемом к двигателю. При определении окончательной мощности, для не специальных моторов, следует пользоваться рядом номиналов мощностей указанных в стандартах. Так, например, полученные значения в 39,4 или 6,4 *кВт* вероятно ошибочны, так как такого номинала в стандарте нет. При приближении к стандарту получим 37 и 6,3 *кВт* соответственно. Следует так же, для сравнения полученного расчета, ориентироваться на доступную документацию по электродвигателям, где указаны мощности электродвигателей с размерами статоров, с их длинами, диаметрами внешними и внутренними и другими полезными данными. [19, 35, 36] Окончательно мощность определится при расчете и в особенности при внимательном расчете заполнения паза медью способной нести достаточную плотность тока в обмотке.

Ниже приводится таблица номинальных мощностей по ГОСТ 12139–84 "Машины электрические вращающиеся, ряды номинальных мощностей напряжений и частот", в соответствии с которым выпускаются двигатели общего применения. Двигатели специального применения, не общепромышленного, а так же старых годов выпуска могут не отвечать приведенному стандарту.
Мощность двигателя ограничена только одним обстоятельством – нагревом. Например, двигатель номинальной мощностью 11 *кВт* может нести нагрузку 17 *кВт* при кратковременном режиме ПВ15%, а при ПВ100% – 10 *кВт*. Все двигатели сконструированы с учетом продолжительности их работы указываемой в паспорте мотора. В зависимости от продолжительности включения и нагрузки значения *кпд* и *cosφ* различны.

При выполняемом расчете по имеющемуся статору, помимо очевидных данных, необходимо понимать условия работы ремонтируемого двигателя, здесь может применятся только умение расчетчика, ориентирующегося во множестве задаваемых переменных при расчете новой обмотки при ремонте, прежде всего в значения индукции в теле статора и воздушном зазоре, плотности тока в обмотке и тех допущений которые невозможно отдельно учесть в формулах расчета. Следует иметь ввиду, что на протяжении времени эксплуатации двигателя электротехническая сталь, из которой набран сердечник имеет свойство старения. Структура стали ухудшается прежде всего в части потерь, потери в стали несколько возрастают, уменьшается способность нести магнитную нагрузку, ухудшается изоляция между листами набора. Ухудшение магнитных свойств стали составляет примерно 4 – 8 % в год в зависимости от марки. От двигателя бывшего в эксплуатации несколько лет уже нельзя вновь получить паспортную эффективность. В целом предельный срок эксплуатации стали статора, ротора электродвигателя можно принять в 20 лет.

Таблица 1. Ряды номинальных мощностей электродвигателей.

Вт				*кВт*				
0,025	0,16	1,6	16	0,12	1,1	11	110	(1120)
0,060	0,25	2,5	25	0,18	1,5	(13)	(125)	1250
	0,4	4,0	40	0,25	(1,8)	15	132	(1400)
	0,60	6,0	60	0,37	2,2	(17)	150	1600
			90	0,55	3,0	18,5	160	(1800)
				0,75	(3,7)	(20)	185	2000
					4,0	22	200	(2250)
					5,5	(25)	220	2500
					6,3	30	250	(2800)
					7,5	(33)	280	3150
					(9)	37	300	3550
						(40)	315	4000
						45	335	(4500)
						(50)	355	5000
						55	375	(5600)
						63	400	6300
						75	425	(7100)
						(80)	450	8000
						90	475	(9000)
							500	
							530	
							560	
							600	
							630	
							670	
							710	
							750	
							800	
							850	
							900	
							950	

Значения указанные в скобках являются малоупотребительными.

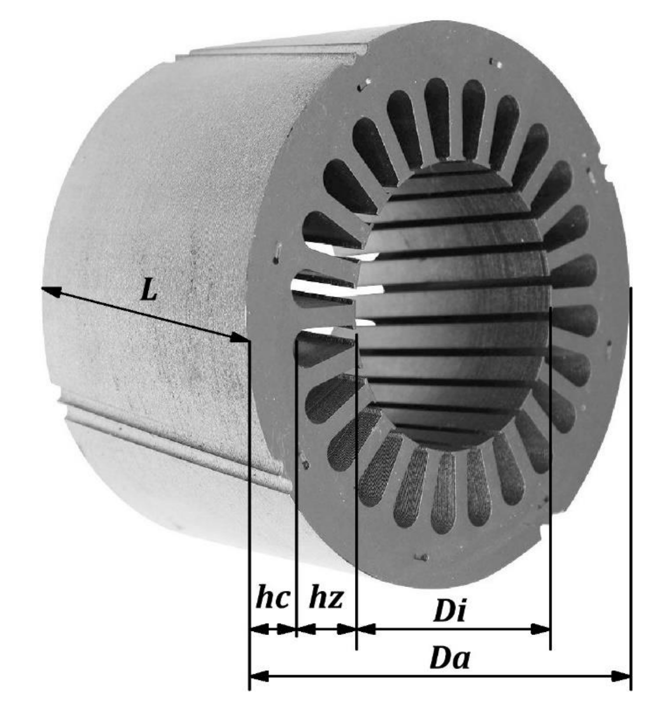


Рис. 2. Размеры необходимые для расчета

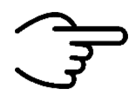
4. Размеры статора необходимые для расчета.

Размеры обмера статора:
Da – внешний диаметр,
Di – внутренний диаметр,
L – длина статора, измеренная по дну паза,
hz – полная высота паза, от дна до расточки, hc – высота ярма, также встречается в литературе название "спинка". Все размеры, как принято в машиностроении, в миллиметрах.

5. Основная формула подсчета витков в фазе.

$$w\text{ф} = \frac{ke \times U\text{ф} \times a}{4{,}443 \times f \times k\text{об} \times \Phi}$$

где: wф – витков в одной фазе, ke – коэффициент падения напряжения в обмотке, Uф – фазное напряжение, напряжение приложенное к одной фазе обмотки, меньшее напряжение при соединении обмотки треугольник/звезда, a – количество параллельных ветвей в фазе, если 1 – параллельных ветвей нет, *kоб* – коэффициент обмотки, f – частота сети, *гц*., (50 *гц*.), Ф – магнитный поток, *Вб* (Вебер) через некоторую площадь пронизываемую магнитными линиями, 4,443 – постоянная величина образованная от $\pi \times \sqrt{2}$.



В расчете предварительно задаются индукцией в каком либо одном месте электродвигателя, в воздушном зазоре между ротором и статором, в ярме или в зубцах, затем проверяют индукцию в двух других местах и при необходимости корректируют расчет.

Магнитный поток от заданной индукции в воздушном зазоре:

$$\Phi = \frac{B\delta \times Di \times L}{p \times 10^6} \quad \text{обратный подсчет: } B\delta = \frac{\Phi \times p \times 10^6}{Di \times L}$$

где: $B\delta$ – индукция в воздушном зазоре, *Тл*. (Тесла), Di – внутренний диаметр расточки статора, *мм*., L – длина статора, *мм*., p – пар полюсов электродвигателя ($2p/2$).
Магнитный поток от заданной индукции в ярме (спинке):

$$\Phi = \frac{B\text{c} \times 2 \times k\text{c} \times L \times h\text{c}}{10^6} \quad \text{обратный подсчет: } B\text{c} = \frac{\Phi \times 10^6}{2 \times k\text{c} \times L \times h\text{c}}$$

где: Bc – магнитная индукция в ярме, *Тл*, kc – коэффициент заполнения сталью статора, данные приведены далее, L – длина статора, *мм*., hc – высота ярма, *мм*. Все размеры в *мм*.
Магнитный поток от заданной индукции в зубцах:

$$\Phi = \frac{Bz \times Z \times bz \times L \times kc}{\pi \times p \times 10^6} \quad \text{обратный подсчет: } Bz = \frac{\Phi \times \pi \times p \times 10^6}{Z \times bz \times L \times kc}$$

где: Bz – магнитная индукция в зубцах, *Тл.*, Z – количество пазов статора, bz – ширина зубца статора, *мм.*, kc – коэффициент заполнения сталью статора, π – число "пи" (3,14159), p – количество пар полюсов электродвигателя. Все размеры в *мм.*, 10 в шестой степени = 1000000.

Магнитные индукции в воздушном зазоре, в ярме, в зубцах в общепромышленных электродвигателях находятся в некоторых пределах, типичные значения *Тл.* (Тесла):

воздушный зазор $B\delta$ = 0,6 – 0,9; ярмо Bc = 1,5 – 1,7; зубцы Bz = 1,6 – 1,9.

Индукции в статоре зависят друг от друга. Обычно предварительно задаются индукцией в воздушном зазоре. Средние рекомендуемые значения индукции $B\delta$ в воздушном зазоре в зависимости от количества полюсов, класса защиты и внешнего диаметра статора Da приведены далее на рис. 3. Средние значения индукции в ярме и зубцах даны в таблице. 2.

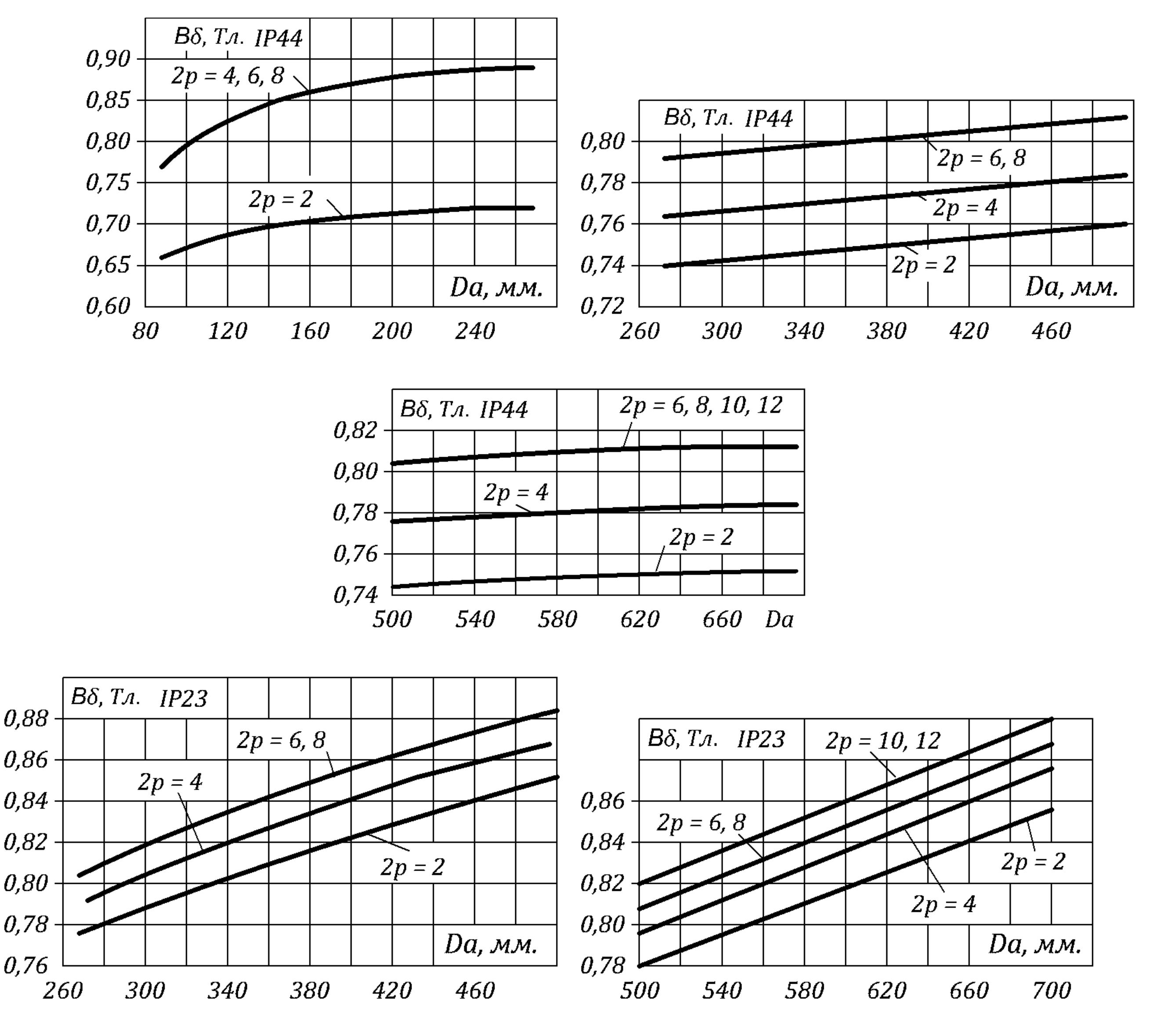
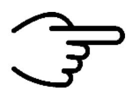


Рис. 3. Средние значения $B\delta$ асинхронных двигателей со степенью защиты IP44 и IP23 охлаждением вентилятором на валу при внешнем диаметре статора, Da, *мм*.

Таблица 2. Средние значения электромагнитных нагрузок для асинхронных двигателей в ярме и зубцах в зависимости от количества полюсов, высоты оси вращения и класса защиты.

h, мм.	2*p*	*ярмо, Bc, Тл.*
50 – 250	2, 4	1,55 – 1,75
	6	1,4 – 1,6
	8	1,1 – 1,3
280 – 355	2, 4, 6, 8	1,45 – 1,65
	10, 12	1,2 – 1,4
400 – 450	4, 6, 8	1,3 – 1,5
	10, 12	1,1 – 1,3

h, мм.	2*p*	*зубцы, Bz, Тл.*	
		IP44	IP23
50 – 132	2, 4, 6, 8	1,75 – 1,95	1,8 – 2,0
160 – 250	2	1,75 – 1,95	1,9 – 2,1
	4, 6, 8	1,6 – 1,8	1,7 – 1,9
280 – 315	10, 12	1,6 – 1,8	1,7 – 1,9



Количество витков фазы возможно подсчитать без расчета магнитного потока Ф, как было показано выше, а непосредственно от магнитной индукции:

в воздушном зазоре:

$$w\text{ф} = \frac{ke \times U\text{ф} \times p \times 10^6 \times a}{4{,}443 \times f \times k\text{об} \times Di \times L \times B\delta}$$

обратный подсчет

$$B\delta = \frac{ke \times U\text{ф} \times p \times 10^6 \times a}{4{,}443 \times f \times k\text{об} \times Di \times L \times w\text{ф}}$$

в ярме:

$$w\text{ф} = \frac{ke \times U\text{ф} \times 10^6 \times a}{4{,}443 \times f \times k\text{об} \times 2 \times kc \times L \times hc \times Bc}$$

обратный подсчет:

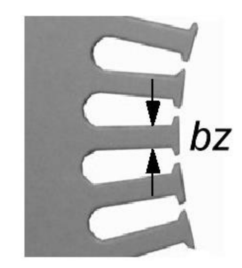
$$B\text{c} = \frac{ke \times U\text{ф} \times 10^6 \times a}{4{,}443 \times f \times k\text{об} \times 2 \times kc \times L \times hc \times w\text{ф}}$$

в зубцах:

$$w\text{ф} = \frac{ke \times U\text{ф} \times p \times \pi \times 10^6 \times a}{4{,}443 \times f \times k\text{об} \times Z \times bz \times L \times kc \times Bz}$$

обратный подсчет:

$$Bz = \frac{ke \times U\text{ф} \times p \times \pi \times 10^6 \times a}{4{,}443 \times f \times k\text{об} \times Z \times bz \times L \times kc \times w\text{ф}}$$



где: ke – коэффициент падения напряжения, Uф – напряжение фазное (наименьшее напряжение при соединении треугольник/звезда), p – пар полюсов двигателя, π – число "пи" 3,14159. a – количество параллельных ветвей в фазе (если нет, то ставим 1), f – частота тока (50 *гц*), kоб – коэффициент обмотки, Di – внутренний диаметр статора, *мм.*, L – длина статора, *мм.*, hc – высота ярма, *мм.*, bz – ширина зубца, *мм.* (см. рисунок), Z – количеств пазов в статоре, wф – витков в фазе, kc – коэффициент заполнения сталью статора (~ 0,93 – 0,95), десять в шестой степени = 1000000, в формуле индукции в ярме Bc присутствует множитель 2, так как магнитный поток полюса в ярме статора разделяется на две части.

В расчете можно применять тот набор формул которые удобны расчетчику. Приведенные формулы без расчета Ф удобны для проверки двигателя имеющего фабричную обмотку в случае сомнения. Подставив приближенные ke (0,92 – 0,98), kоб – (0,93 – 0,95) и данные обмера статора, количество витков фазы (или в пазе, см. далее), возможно определить примерные индукции и находятся ли они в нужных пределах.

Индукции зависимы:

$$Bz = \frac{B\delta \times tz}{bz \times kc} \quad \text{где: } tz - \text{пазовое деление, } tz = \frac{\pi \times Di}{Z}$$

$$Bc = \frac{B\delta \times Di}{2p \times kc \times hc}$$

Проверка количества полюсов от индукций $B\delta$ и Bc:

$$2p = \frac{B\delta \times Di}{Bc \times kc \ \times hc}$$

где: π – число "пи", Di – внутренний диаметр статора, *мм.*, bz – ширина зубца, *мм.*, Z – количество пазов статора, kc – коэффициент заполнения сталью статора, hc – высота ярма статора, *мм.*, (спинки), $2p$ – полюсов статора.
Представляет интерес подсчет витков сразу в пазе от индукции $B\delta$ (*Тл.*) в воздушном зазоре:

$$w\text{п} = \frac{3 \times ke \times U\text{ф} \times a \times 10^6}{\sqrt{2} \times B\delta \times f \times Z \times k\text{об} \times L \times \tau} \quad \text{где полюсное деление } \tau = \frac{\pi \times Di}{2p}$$

обратный расчет индукции от количества витков в пазе:

$$B\delta = \frac{3 \times ke \times U\text{ф} \times a \times 10^6}{\sqrt{2} \times w\text{п} \times f \times Z \times k\text{об} \times L \times \tau}$$

где $\sqrt{2} \approx 1{,}414$, τ – полюсное деление не следует путать с пазовым делением, wп – количество витков в пазе.



Количество витков в пазе от количества витков в фазе:

$$w\text{п} = \frac{w\text{ф} \times 6}{Z}$$

витков фазы от количества витков в пазе:

$$w\text{ф} = \frac{w\text{п} \times Z}{6}$$

где wф – витков в фазе, wп – витков в пазе, Z – количество пазов статора. Число 6 образовано от $2 \times m$, где два – множитель количества сторон катушки, катушка всегда имеет две стороны помещаемых в паз, m – количество фаз. В литературе встречается название эффективный проводник = виток.

q пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m}$$

где $2p$ – количество полюсов, Z – пазов статора, m – количество фаз (3).
Полученное wп округляют до ближайшего целого числа. При *двухслойной* обмотке витков в пазе wп должно быть выбрано, как правило четным. Однако при малых значениях количества витков, например wп = 11; 15, иногда приходится выбирать wп нечетным.

При этом катушки имеют разное количество проводников, отличающееся на один виток. Применяя обмотки с разновитковыми катушками, следует обращать внимание на образование, при их наличии, симметричных параллельных ветвей, количество витков в параллельных ветвях фазы должно быть строго одинаковым. Выбрав число wп уточняют параметры wф, $B\delta$ и другие при необходимости.

В электродвигателях для набора статора и ротора в основном применяется сталь толщиной 0,5 *мм*. Листы статора изолируются лаком или формированием оксидно–фосфатной пленки. Коэффициент kc, приведен в таблице 3, вносится в расчете определения магнитной нагрузки в ярме и зубцах, так как магнитная нагрузка в этих местах определяется уравнениями исходя из объема стали, а статор не состоит из массива металла, набран из листов и изоляция занимает некоторое место, то есть реальная длина стали не равна длине статора.

Таблица 3. Коэффициент заполнения сталью сердечника статора, kc.

коэффициент kc		
при толщине стали, *мм.*	оксидированных	лакированных
0,15	0,84	0,81
0,2	0,91	0,88
0,25	0,92	0,88
0,28	0,92	0,88
0,30	0,92	0,89
0,35	0,93	0,91
0,5	0,95	0,93
0,7	0,98	0,96
1,0	0,98	0,97

В импортных двигателях толщина листа набора статора может быть не соответствующей метрической системе, а дюймовой, например 0,37, 0,55 *мм.* и т. д., целесообразно проверять и брать подходящий коэффициент kc.

7. Коэффициент обмотки kоб.

Коэффициент обмотки состоит из *двух* коэффициентов:
коэффициента укорочения kу шага катушки
и коэффициента распределения kр катушечной группы.
Коэффициент обмотки есть произведение этих двух коэффициентов:

$$k\text{об} = k\text{у} \times k\text{р}$$

Коэффициент обмотки почти всегда меньше единицы. Значение коэффициента обмотки можно рассматривать как значение *кпд* катушечной группы в создании магнитного поля полюса. При расчетах коэффициент обмотки вносится в подсчет витков фазы для получения правильного количества витков. Если шаг катушки принятый при расчете равен полюсному делению (диаметральному шагу) и не укорачивается, то коэффициент укорочения равен 1. Шаг "*у*" катушки (обмотки) в моторах свыше нескольких *кВт* (при внутреннем диаметре примерно более 160 *мм.*), как правило, выбирается меньшим чем полный (диаметральный) полюсный шаг.
При работе двигателя в его обмотке возникают так называемые гармоники – *эдс* являющиеся вредными для работы, при сложном взаимодействии между собой полюсов статора, полюсов ротора, зубцов статора и ротора и т. п., 3, 7, 9–я и другие гармоники кратные частоте питания 50 *гц* (или 60 *гц*).

Первая гармоника это и есть частота сети, вторая соответственно 100 *гц*, третья 150 *гц*, девятая 450 *гц* и так далее (так же и четные гармоники 4, 6, 12 и. т. д., четные гармоники менее вредны).
Для подавления возникновения гармоник выполняется сокращение шага обмотки. В небольших моторах сокращением шага можно пренебречь. При сокращении шага заметно снижается расход обмоточного провода, в машинах с жесткими катушками сокращение шага так же может выполняться по технологическим соображениям изготовления обмотки. Следует заметить, для работы предпочтительное соединение обмотки "звезда", так как при этом гармоники кратные трем практически отсутствуют.



Подсчет коэффициента сокращения (укорочения) *k*у шага обмотки.

$$k\text{у} = cos\frac{\alpha}{2}$$

где α – уменьшение шага выраженное в *электрических* градусах.
Значение *электрических* градусов принимается всегда 180° на полюс. То есть в статоре по полной окружности двухполюсного двигателя 360° *электрических градусов* (2 × 180), в статоре четырехполюсного 720° (4 × 180) и так далее. Электрические градусы применяются для удобства расчетов. Смотрите рисунок 4.
Пример. 36 пазовый 4 полюсный мотор. Требуется подсчитать коэффициент укорочения шага обмотки.

$$\text{шаг обмотки:} \quad y = \frac{36}{4} = 9$$

Шаг 9, то есть из 1 паза в 10 является полным или диаметральным, если это значение так и остается, то коэффициент укорочения остается равным 1, *k*у = 1.
Принимаем укорочение шага на 2 паза, 9 – 2 = 7 (полный: *у* = 9, укороченный: *у*к = 7)
Подсчитаем сколько *электрических* градусов приходится на один паз статора.

$$\alpha = \frac{180° \times 2p}{Z} = \frac{180° \times 4}{36} = \frac{720°}{36} = 20°$$

здесь 2*p* – количество полюсов, *Z* – количество пазов статора.
Другая формула для *α*:

$$\alpha = \frac{180°}{Zp} = \frac{180°}{9} = 20°$$

где *α* = угол занимаемый одним пазом, 180° *электрических* градусов приходящихся на каждый полюс, *Zp* – пазов статора на полюс: 36 пазов/4 полюса = 9 пазов на полюс.

Подсчитаем на сколько *электрических* градусов сократится шаг:

$$(9 \text{ пазов} \times 20°) - (7 \text{ пазов} \times 20°) = 180° - 140° = 40°$$

или

$$180° \times \frac{2}{9} = 40° \qquad \text{или, так же очевидно: 2 паза } \times \alpha = 2 \times 20° = 40°$$

получим коэффициент укорочения:

$$k\text{у} = cos\frac{\alpha}{2} = cos\frac{40°}{2} = cos20° = 0{,}9396$$



Другие равнозначные формулы коэффициента укорочения шага:

$$k\text{у} = sin\left(\frac{y\text{к}}{y} \times 90°\right) = sin\left(\frac{7}{9} \times 90°\right) = sin\,70° = 0{,}9396$$

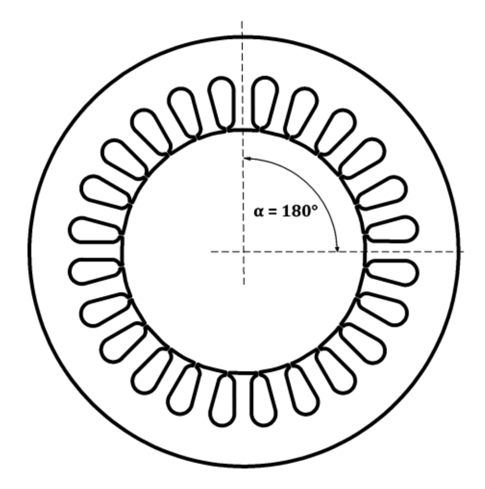
или

$$ky = sin\frac{180° \times p \times y\text{к}}{Z} = sin\frac{180° \times 2 \times 7}{36} = 0{,}9396$$

или

$$k\text{у} = sin\left(\frac{y\text{к} \times 90°}{y}\right) = sin\left(\frac{7 \times 90°}{9}\right) \text{ или } k\text{у} = cos\left(\frac{(y - y\text{к}) \times 90°}{y}\right) = cos\left(\frac{(9-7) \times 90°}{9}\right)$$

где: *у*к – сокращенный шаг, в нашем примере 7 (1 – 8), *у* – полный шаг 9 (1 – 10, из первого паза в десятый), *р* – пар полюсов, *Z* – количество пазов статора.
Для получения синуса или косинуса полученных значений воспользуйтесь калькулятором (в том числе имеющимся на вашем компьютере, смартфоне) или готовыми таблицами В. М. Брадиса значений синуса, косинуса.
Полученный коэффициент относится как к однослойным, так и к двухслойным обмоткам, двухслойная обмотка дает более лучшее распределение магнитного поля в воздушном зазоре. Сокращение шага катушки обычно записывается как соотношение значения полного шага к значению укороченного, т. е. как часть от полного, в выше приведенном примере 7/9 = 0,777 (≈ 78% или β = 0,78), по полученной цифре можно найти коэффициент обмотки в готовых таблицах. Идеальный шаг для двигателя с 4 или более полюсами составляет ~ 83% полного шага. Для 2 полюсной обмотки обычно требуется использование более короткого шага, чтобы мотор был более эффективным, предпочтительное сокращение шага составляет ~ 67%.



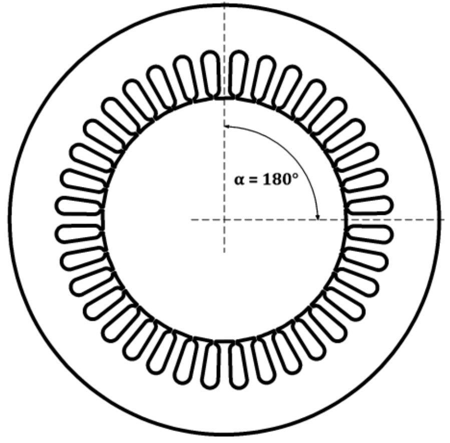


Рис. 4. Пример статора 24 и 36 пазов на 4 полюса и угол 180° *электрических* градусов одного полюса.



Коэффициент распределения *k*р.

Коэффициент распределения *k*р учитывает тот факт, что все катушки катушечной группы не находятся в центре полюса. Катушки не сосредоточены на полюсе, как в двигателях постоянного тока, они рассредоточены, распределены по нескольким пазам. Поскольку катушки распределены, концентрация создаваемого ими магнитного поля несколько рассеивается. Коэффициент распределения так же как и коэффициент сокращения шага можно условно рассматривать как *кпд* в создании магнитных силовых линий.
Коэффициент распределения *k*р при *целом q* (пазов на полюс и фазу) подсчитывается по следующей формуле:

$$k\text{р} = \frac{sun\frac{q \times \alpha}{2}}{q \times sin\frac{\alpha}{2}} \quad \text{или} \quad k\text{р} = \frac{0{,}5}{q \times sin\frac{30°}{q}}$$

Пример. 36 пазовый 4 полюсный трехфазный мотор. Требуется подсчитать коэффициент распределения обмотки.
Пазов на полюс и фазу q:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{36}{4 \times 3} = 3$$

Z – количество пазов статора, $2p$ – количество полюсов, m – количество фаз (3).

или так же пазов на полюс и фазу: $q = \frac{Zp}{m} = \frac{9}{3} = 3$, где пазов на полюс: $Zp = \frac{36}{4} = 9$

Электрический угол занимаемый одним пазом:

$$\alpha = \frac{180°}{Zp} = \frac{180°}{9} = 20°$$

коэффициент распределения в этом примере:

$$k\text{р} = \frac{sin\frac{q \times \alpha}{2}}{q \times sin\frac{\alpha}{2}} = \frac{sin\frac{3 \times 20^o}{2}}{3 \times sin\frac{20^o}{2}} = \frac{sin30°}{3 \times sin10°} = \frac{0,5}{0,52094} = 0,9598$$

Пазовые стороны одной катушечной группы, расположенные в соседних пазах, занимают q пазов и образуют фазную зону, определяемую углом:

$$\alpha\text{ф} = \frac{180^o \times 2p \times q}{Z} \quad \text{для примера: } \alpha\text{ф} = \frac{180^o \times 4 \times 3}{36} = 60^o$$

где αф – угол фазной зоны. На практике почти исключительно применяются такие шестидесятиградусные обмотки (180°/3 фазы = 60° электрических градусов). В некоторых случаях применяются обмотки называемые с "расширенной фазной зоной" улучшающей форму магнитного поля, где фаза занимает несколько больший угол αф, за счет большего q, чем при расчете при 60°.
Например, для предыдущего примера при q = 4, вместо 3:

$$\alpha\text{ф} = \frac{180^o \times 2p \times q}{Z} = \frac{180^o \times 4 \times 4}{36} = 80^o$$

коэффициент распределения при этом:

$$k\text{р} = \frac{sin\frac{\alpha\text{ф}}{2}}{q \times sin\frac{\alpha\text{ф}}{2 \times q}}$$

пример коэффициента распределения при расширенной фазной зоне:

$$k\text{р} = \frac{sin\frac{\alpha\text{ф}}{2}}{q \times sin\frac{\alpha\text{ф}}{2 \times q}} = \frac{sin\frac{80^o}{2}}{4 \times sin\frac{80^o}{2 \times 4}} = \frac{sin40°}{4 \times sin10°} = \frac{0,64278}{0,69459} = 0,9254$$



Коэффициент распределения при дробном q.

При дробном числе пазов на полюс и фазу вместо q подставляют $N = b \times d + c$. Где b – целая часть дробного q, c – числитель, d – знаменатель (знаменатель дробной части), N – числитель не правильной дроби:

$$q = b + \frac{c}{d} = \frac{N}{d}$$

Например:
для $q = 2{,}5 = {}^5/_2 = 2^1/_2$ можно записать $b = 2$, $c = 1$, $d = 2$: $N = b \times d + c = 2 \times 2 + 1 = 5$
для $q = 1{,}125 = {}^9/_8 = 1^1/_8$ можно записать $b = 1$, $c = 1$, $d = 8$: $N = b \times d + c = 1 \times 8 + 1 = 9$
для $q = 2{,}66667 = {}^8/_3 = 2^2/_3$ можно записать $b = 2$, $c =2$, $d = 3$: $N = b \times d + c = 2 \times 3 + 2 = 8$
для $q = 2{,}75 = {}^{11}/_4 = 2^3/_4$ можно записать $b = 2$, $c = 3$, $d = 4$: $N = b \times d + c = 2 \times 4 + 3 = 11$

и например коэффициент распределения для $q = 2{,}75 = {}^{11}/_4 = 2^3/_4$:

$$k\text{р} = \frac{0{,}5}{N \times sin\frac{30°}{N}} = \frac{0{,}5}{11 \times sin\frac{30°}{11}} = \frac{0{,}5}{0{,}523401} = 0{,}95529$$



Таким образом, обмоточный коэффициент трехфазной рассчитываемой обмотки (для целого q):

$$k\text{об} = cos\frac{\alpha}{2} \times \frac{sin\frac{q \times \alpha}{2}}{q \times sin\frac{\alpha}{2}}$$

В левую или правую части можно поставить другую формулу из приведенных выше, более удобную расчетчику или для требуемого случая расчета. Коэффициент обмотки kоб для выше приведенного примера составит:

$$k\text{об} = k\text{у коэфф. сокр. шага} \times k\text{р коэфф. распределения} = 0{,}9396 \times 0{,}9598 = 0{,}9018$$

В литературе прошлых лет уделено большое внимание обмоткам с дробным q. Связано это с технологией изготовления статорных листов и стремлении более широко использовать один и тот же размер для разного количества полюсов. В настоящее время пазы пробиваются штампом отдельно и при конструировании электродвигателей стараются избегать дробных пазов на полюс и фазу q, так как часто с дробным q обмотка не получается симметричной. Рациональные сокращения шага обмотки и выполнимость обмоток при дробном q даны далее в таблицах 4, 5, 6.

Таблица 4. Выполнимость однослойных и двухслойных трехфазных обмоток при дробном q.

скорость вращения *об. мин.* (синхр.)	$2p$	пазов статора, Z									
		18	24	30	36	42	48	54	60	66	72
3000	2	3	4	5	6	7	8	9	10	–	–
1500	4	1½	2	2½	3	3½	4	4½	5	5½	6
1000	6	1	–	–	2	–	–	3	–	–	4
750	8	–	1	1¼	1½	1¾	2	2¼	2½	2¾	3
600	10	–	–	1	1⅕	1⅖	1⅗	1⅘	2	2⅕	2⅖
500	12	–	–	–	1	–	–	1½	–	–	2

Продолжение таблицы 4.

скорость вращения *об. мин.* (синхр.)	$2p$	пазов статора, Z										
		15	21	27	33	39	45	51	57	63	69	75
3000	2	2½	3½	4½	5½	6½	7½	8½	–	–	–	–
1500	4	1¼	1¾	2¼	2¾	3¼	3¾	4¼	4¾	5¼	5¾	6¼
1000	6	–	–	1½	–	–	2½	–	–	3½	–	–
750	8	–	–	1⅛	1⅜	1⅝	1⅞	2⅛	2⅜	2⅝	2⅞	3⅛
600	10	–	–	–	$1^{1}/_{10}$	$1^{3}/_{10}$	1½	$1^{7}/_{10}$	$1^{9}/_{10}$	$2^{1}/_{10}$	$2^{3}/_{10}$	2½
500	12	–	–	–	–	–	1¼	–	–	1¾	–	–

Таблица 5. Наивыгоднейшее укорочение шага обмотки β, коэффициент kоб в зависимости от числа пазов на полюс и фазу q, в соответствии количества пазов статора Z и числа полюсов $2p$.

β	*ук*	q	*в виде простой дроби*	*kоб*	Число полюсов/число пазов					
					2	4	6	8	10	12
3/3,75 = 0,8	3 (1–4)	1,25	1¼ = $^{5}/_{4}$	0,909	–	15	–	30	–	45
4/4,5 = 0,89	4 (1–5)	1,5	1½ = $^{3}/_{2}$	0,943	9	18	27	36	45	54
5/6 = 0,83	5 (1–6)	2	–	0,933	12	24	36	48	60	72
6/6,75 = 0,89	6 (1–7)	2,25	2¼ = $^{9}/_{4}$	0,939	–	27	–	54	–	81
6/7,5 = 0,8	6 (1–7)	2,5	2½ = $^{5}/_{2}$	0,909	15	30	45	60	75	90
7/9 = 0,78	7 (1–8)	3	–	0,901	18	36	54	72	90	–
8/9 = 0,89	8 (1–9)	3	–	0,945	18	36	54	72	90	–
7/12 = 0,58	7 (1–8)	4	–	0,759	24	–	–	–	–	–
8/12 = 0,67	8 (1–9)	4	–	0,829	24	–	–	–	–	–
9/12 = 0,75	9 (1–10)	4	–	0,883	24	–	–	–	–	–
10/12 = 0,83	10 (1–11)	4	–	0,925	24	48	72	96	–	–
11/15 = 0,73	11 (1–12)	5	–	0,873	30	60	–	–	–	–
12/15 = 0,8	12 (1–13)	5	–	0,909	30	60	90	–	–	–
13/15 = 0,87	13 (1–14)	5	–	0,935	30	60	90	–	–	–
11/18 = 0,61	11 (1–12)	6	–	0,783	36	–	–	–	–	–
12/18 = 0,67	12 (1–13)	6	–	0,828	36	–	–	–	–	–
13/18 = 0,73	13 (1–14)	6	–	0,866	36	–	–		–	–
14/18 = 0.78	14 (1–15)	6	–	0,898	36	–	–	–	–	–
15/18 = 0,83	15 (1–16)	6	–	0,923	36	72	–	–	–	–
13/24 = 0,54	13 (1–14)	8	–	0,717	48	–	–	–	–	–
14/24 = 0,58	14 (1–15)	8	–	0,757	48	–	–	–	–	–
15/24 = 0,63	15 (1–16)	8	–	0,794	48	–	–	–	–	–
16/24 = 0,67	16 (1–17)	8	–	0,827	48	–	–		–	–
17/24 = 0,71	17 (1–18)	8	–	0,856	48	–	–	–	–	–

Таблица 6. Количество катушечных групп в фазе и рекомендуемые шаги по пазам в двухслойных и однослойных обмотках "в развалку".

об. мин.	*Z*	*y*	катушечных групп в фазах × катушек в группе	*y*	катушечных групп в фазах × катушек в группе
двухслойная обмотка				однослойная обмотка "в развалку"	
3000	12	1 – 6	2 × 2	1 – 6	2 × 1
3000	18	1 – 8	2 × 3	1 – 8	1 × 1 + 1 × 2
3000	24	1 – 9	2 × 4	1 – 11	2 × 2
3000	30	1 – 11	2 × 5	–	–
3000	36	1 – 13	2 × 6	1 – 16	2 × 3
3000	48	1 – 18	2 × 8	1 – 21	2 × 4
1500	18	1 – 5	2 × 1 + 2 × 2	–	–
1500	24	1 – 6	4 × 2	1 – 6	4 × 1
1500	27	1 – 7	3 × 2+1 × 3	–	–
1500	36	1 – 8	4 × 3	1 – 8; 1 – 9	2 × 1 + 2 × 2
1500	42	1 – 9	2 × 3 + 2 × 4	–	–
1500	48	1 – 11	4 × 4	1 – 11	4 × 2
1500	54	1 – 13	2 × 4 + 2 × 5	–	–
1500	60	1 – 14	4 × 5	–	–
1000	27	1 – 5	3 × 1 + 3 × 2	–	–
1000	36	1 – 6	6 × 2	1 – 6	6 × 1
1000	45	1 – 7	3 × 2 + 3 × 3	–	–
1000	54	1 – 8	6 × 3	1 – 8, 1 – 9	3 × 1 + 3 × 2
1000	72	1 – 11	6 × 4	1 – 11	6 × 2
750	36	1 – 5	4 × 1 + 4 × 2	–	–
750	48	1 – 6	8 × 2	1 – 6	8 × 1
750	54	1 – 7	6 × 2 + 2 × 3	–	–
750	60	1 – 7	4 × 2 + 4 × 3	–	–
750	72	1 – 8	8 × 3	–	–

8. Коэффициент падения напряжения в фазе *ke*.

Часть потерь в электродвигателе приходится на рассеивание мощности в обмотке, так называемые джоулевы потери на активном сопротивлении обмотки фазы *R*ф току фазы. Падение напряжения снижает эффективную *эдс* и прямо пропорционально сопротивлению фазы *R*ф и фазному току *I*ф при нагрузке:

$$ke \ = \ 1 - \frac{I\text{ф} \times R\text{ф}}{U\text{ф}} \quad \text{или} \quad ke = \frac{U\text{ф} - I\text{ф} \times R\text{ф}}{U\text{ф}}$$

Снижение действующего напряжения в фазе, по закону Ома:

$$U = I\text{ф} \times R\text{ф}$$

где *I*ф– ток в фазе, *R*ф – сопротивление фазы. Например, ток *I*ф = 21,71 *А*, сопротивление фазы при 75°С *R*ф = 0,978 *Ом*:

$$U = 21{,}71 \times 0{,}978 = 21{,}23 \text{ вольт}$$

эдс снизится, действующее напряжение в обмотке фазы при приложенном фазном 220 *в*:

$$U\text{ф} = 220 - 21{,}23 = 198{,}77 \text{ вольт}$$

Полученное напряжение *U*ф, с учетом падения, можно так же прямо подставлять в расчетное уравнение подсчета витков, то есть без *ke*.

При окончании расчета обмотки *ke* уточняется и если изменение коэффициента падения напряжения от первоначального принятого значения существенно, требуется изменение количества витков для расчетных индукций. В начале расчета цифрой *ke* задаются. На рисунке 5 приведено оценочное падение напряжение в зависимости от внешнего диаметр статора *Da*, *мм*. и количества полюсов. График составлен на основе данных 1466 двигателей общепромышленного применения и рассчитан по уравнению:

$$ke = \frac{1}{1 + \dfrac{30 \times \delta}{\tau \times q}} \quad \text{где полюсное деление } \tau = \frac{\pi \times Di}{2p}$$

δ – воздушный зазор, *мм*., q – пазов на полюс и фазу.

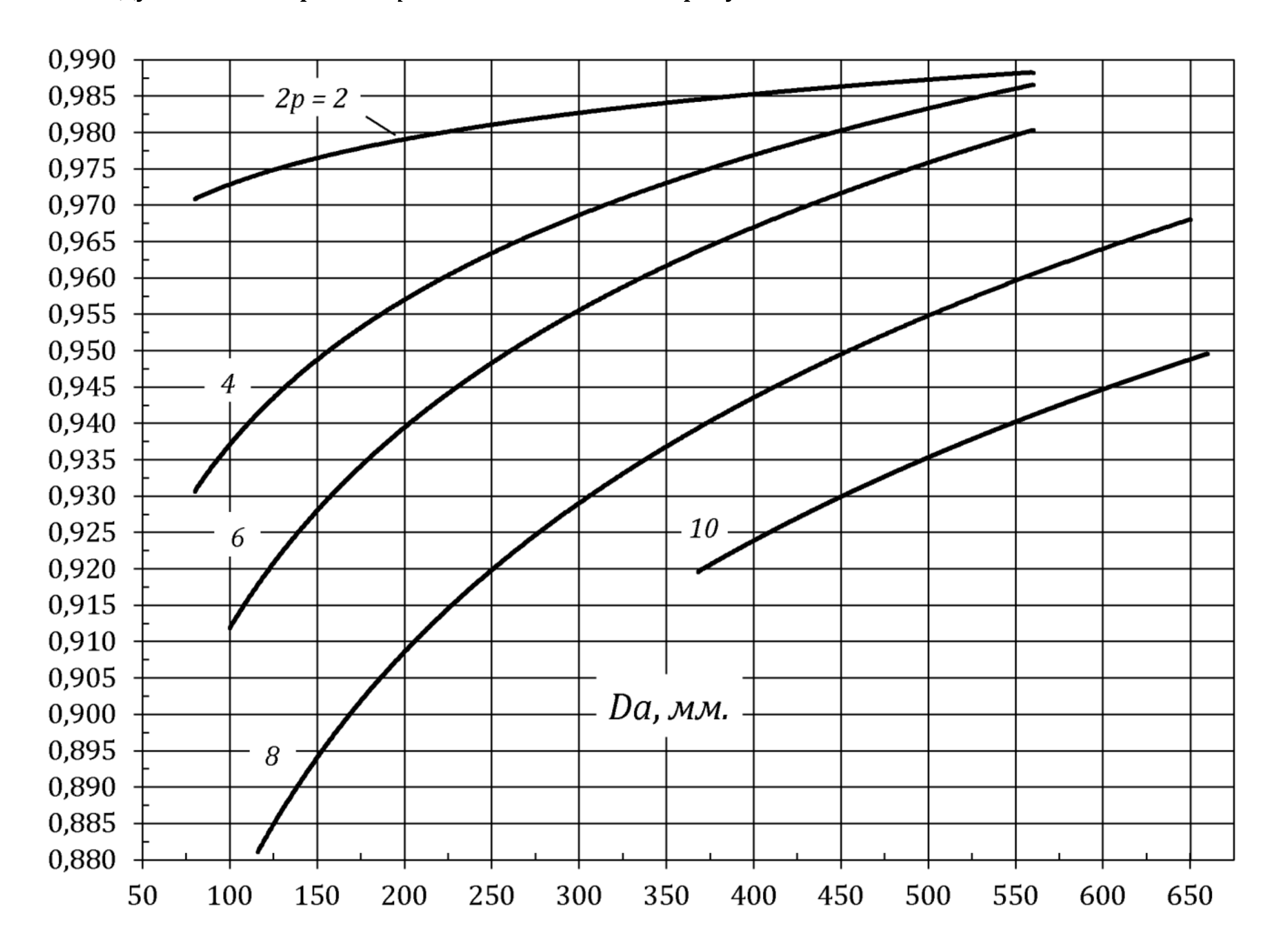


Рис. 5. Коэффициент *ke* в зависимости от внешнего диаметра статора и количества полюсов.

Увеличение воздушного зазора при ремонте увеличивает ток холостого хода, снижает *кпд*, пусковой ток электродвигателя и снижает тягу на валу. Считается, что при увеличении воздушного промежутка между ротором и статором более чем на четверть от фабричного, двигатель можно признать не годным и отстранять от работы.

9. Расчет площади просвета паза.

Расчет площади паза не сложен, если форму паза разделить на простые фигуры, окружность и половина окружности, трапецию, прямоугольник. Подсчитав сумму площадей этих геометрических фигур получим точное значение площади паза. На рис. 6 даны наиболее употребительные формы пазов статора со всыпной обмоткой.

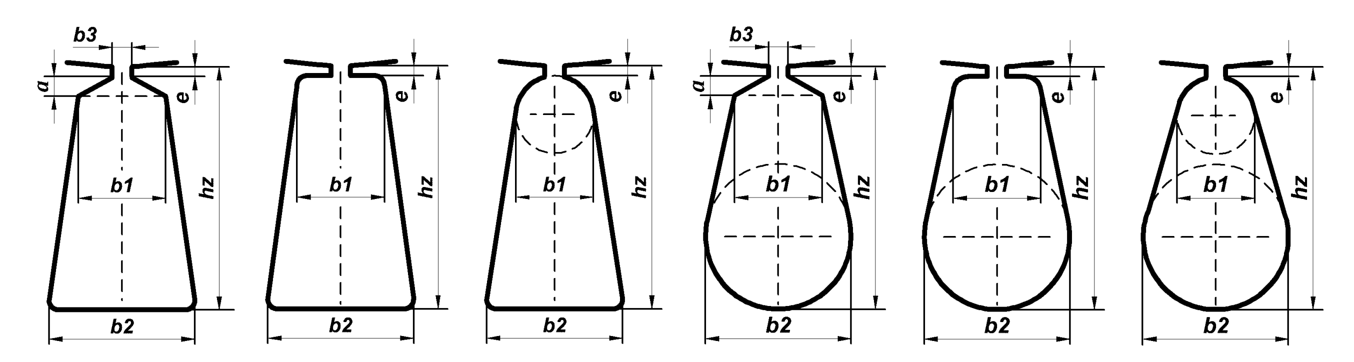
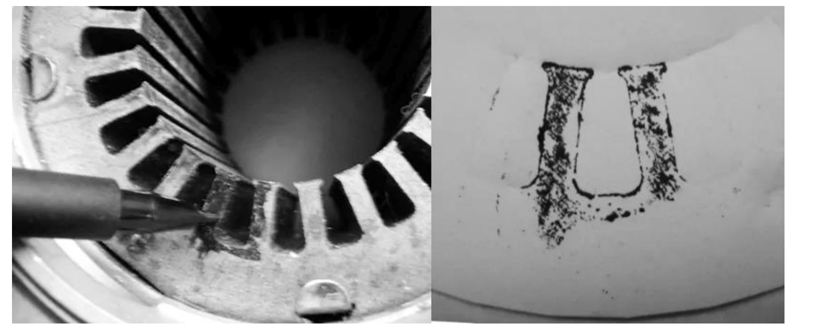


Рис. 6. Пазы статора.

Снятие размеров паза необходимо делать со вниманием, так как последующее расчетное заполнение паза проводниками имеет важное значение для оценки мощности электродвигателя. Непосредственное измерение размеров паза в корпусе двигателя часто невозможно из–за недостатка места для измерительного инструмента. Целесообразно использовать эпоксидную мастику для получения оттиска формы паза, затем, после отвердевания мастики, измерение размеров штангенциркулем не представляет затруднений. Можно использовать и обычный пластилин, после снятия оттиска, если доступен холодильник, положить в морозилку или в холодное время года оставив на некоторое время вне помещения. Снятие оттиска на бумаге, см. рис. 7, и последующее измерение так же возможно, хотя этот метод менее точен. Целесообразно использование конических линеек. Отсчет размера отверстия, ширины, с достаточной точностью непосредственно по отметкам на линейке.



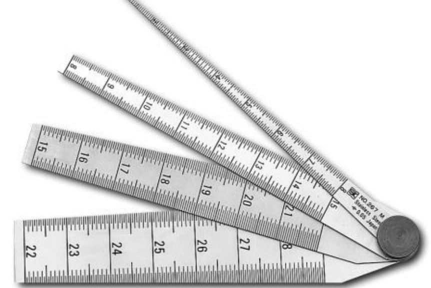


Рис. 7. Пример снятия размера паза, измерительный инструмент.

Площадь круга:

$$S\text{кр} = \pi \times R^2 \quad \text{или} \quad S\text{кр} = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

где π – число "пи" (3,14159), R – радиус круга, равный половине диаметра (D разделить на 2), D – диаметр круга.
Площадь трапеции (равносторонней):

$$S\text{тр} = \frac{a + b}{2} \times h\text{тр}$$

где a и b – длины оснований трапеции, hтр – высота трапеции, опущенная на основание.

Пример. Измерение размеров паза двигателя дало следующие результаты: полная высота паза, от дна до расточки: hz = 32 *мм*., высота шлица e = 2 *мм*., $b1$ = 10 *мм*., $b2$ = 14 *мм*., форма паза на рисунке 8. Форма паза состоит из двух фигур, полуокружности и трапеции. Площадь круга:

$$S\text{кр} = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{3{,}14159 \times 14^2}{4} = 153{,}93 \text{ мм}^2$$

где D – размер $b2$. Соответственно площадь половины окружности:

$$\frac{153{,}93}{2} = 76{,}96 \text{ мм}^2$$

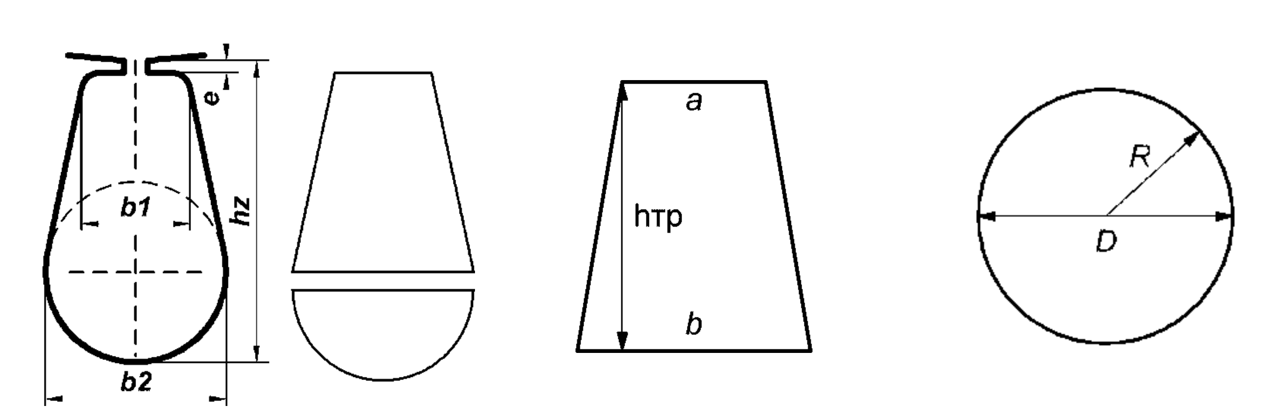


Рис. 8. Форма паза к примеру расчета.

Высота трапеции получится вычитанием из полной высоты паза hz, высоты шлица e, и вычитание радиуса окружности $b2$.

$$h\text{тр} = hz - e - \frac{b2}{2} = 32 - 2 - \frac{14}{2} = 23 \text{ мм}.$$

Размеры оснований трапеции соответствуют размерам $b1$ = 10 и $b2$ = 14 *мм*.
Отсюда площадь трапеции:

$$S\text{тр} = \frac{a + b}{2} \times h\text{тр} = \frac{10 + 14}{2} \times 23 = 276 \text{ мм}^2$$

Площадь паза, в данном примере, является суммой значений площади одной трапеции и одной полуокружности:

Sпаза = 276 + 76,96 = 352,96 $мм^2$ ≈ 353 $мм^2$

Пример. Высота паза hz = 21 *мм*., размер $b1$ = 7,8 *мм*., $b2$ = 10,8 *мм*., ширина шлица $b3$ = 3,0 *мм*., высота заплечика a = 3,0 *мм*., высота шлица e = 1,0 *мм*. Форма паза, дана на рисунке 9 и очевидно состоит из двух трапеций.
Малая верхняя трапеция: высоту трапеции определяет размер a, основания соответственно размер $b3$ и $b1$, площадь трапеции Sтр:

$$S\text{тр} = \frac{a + b}{2} \times h\text{тр} = \frac{7{,}8 + 3}{2} \times 3 = 16{,}2 \text{ мм}^2$$

Большая трапеция, ее высота:

$$h\text{тр} = hz - e - a = 21 - 1 - 3 = 17 \text{ мм}.$$

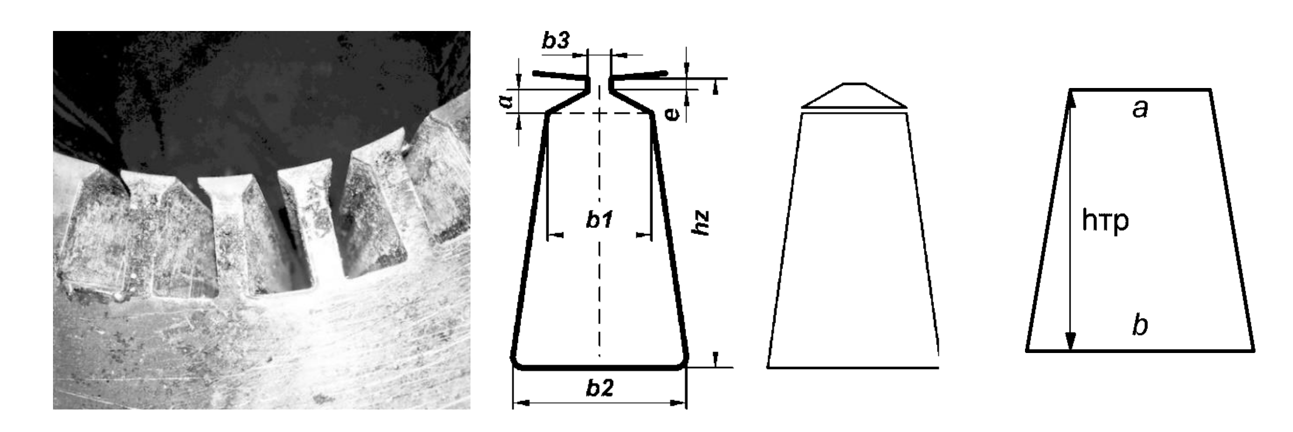


Рис. 9. Форма паза к примеру расчета.

Основания трапеции соответствуют размеры *b1* и *b2*. Площадь трапеции:

$$S\text{тр} = \frac{a+b}{2} \times h\text{тр} = \frac{7{,}8+10{,}8}{2} \times 17 = 158{,}1\ \text{мм}^2$$

Площадь паза является здесь суммой значений площади двух трапеций:

$$S\text{паза} = 16{,}2 + 158{,}1 = 174{,}3\ мм^2$$

Размеры паза, как правило, имеют всегда десятые доли миллиметра, такова особенность расчета электродвигателей при их конструировании. Размер *е* – высота шлица в электродвигателях со всыпной обмоткой редко превышает 1,2 *мм*. Минимальный размер 0,5 *мм*. Сечение просвета паза для других форм паза подсчитывается также – разделением формы на простые геометрические фигуры.
В практике ремонте встречается необходимость пересчета обмотки из прямоугольных проводников на проводники круглого сечения. Прямоугольные проводники размещаются в пазах прямоугольной формы, см. рис. 10. Площадь прямоугольника получается произведением его сторон, *a* × *b*.
Пример. Паз прямоугольной формы, высота полная *hz* = 42 *мм*., ширина *b1* = 7 *мм*., размер *е* = 6,5 *мм*. Площадь паза:

$$S\text{паза} = (hz - e) \times b1 = (42 - 6{,}5) \times 7 = 248{,}5\ \text{мм}^2$$

Рис. 10. Прямоугольный паз.

10. Подсчет заполнения паза изоляцией.

Подсчет площади занимаемой изоляцией в пазе считается по его периметру, а точнее по длине линий фигур на которые условно разделен паз, по длине сторон трапеции, по длине полуокружности, сторонам прямоугольника. Дальнейший расчет заполнения паза проводниками, расчет диаметров проводников, происходит из оставшейся площади просвета паза после изолирования.
Пример. Измерение размеров паза двигателя дало следующие результаты: полная высота паза, от дна до расточки: *hz* = 32 *мм*., высота шлица *е* = 2 *мм*., *b1* = 10 *мм*., *b2* = 14 *мм*. (*b2* = *D*), форма паза на рисунке 11. Форма паза состоит из двух фигур, полуокружности и трапеции. Длина линии окружности:

$$L\text{окр} = 2 \times \pi \times R = \pi \times D$$

где π – число "пи", *R* – радиус, *D* – диаметр.

длина окружности:

$$L\text{окр} = \pi \times D = 3{,}14159 \times 14 = 43{,}98 \text{ мм.}$$

половина соответственно: 43,98/2 = 21,99 ≈ 22 мм.

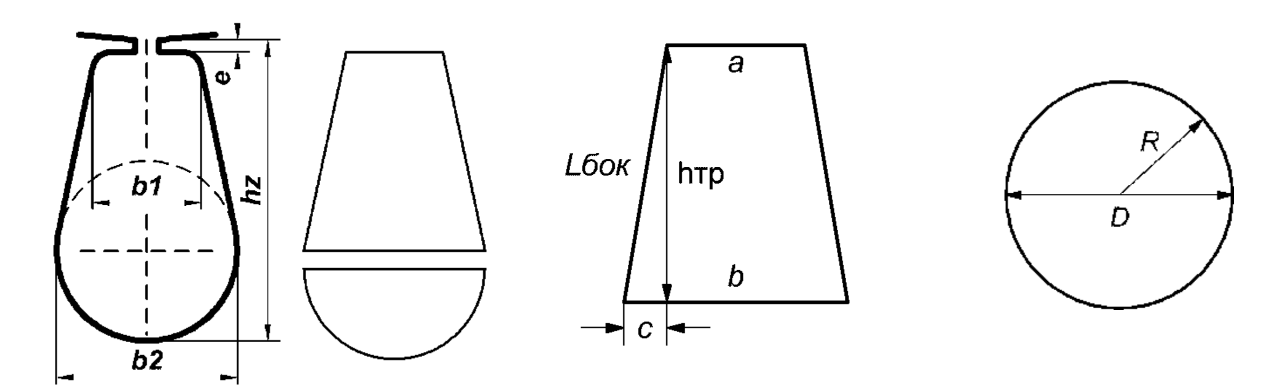


Рис. 11. К примеру расчета периметра паза.

Нижнее основание трапеции не участвует в подсчете периметра и толщины изоляции, смотрите рис. 11, длина верхнего основания известна. Необходимо подсчитать длины боковых сторон. Для этого надо знать высоту трапеции. Высота трапеции получится вычитанием из полной высоты паза высоты шлица e, и вычитание радиуса окружности $b2$.

$$h\text{тр} = hz - e - \frac{b2}{2} = 32 - 2 - \frac{14}{2} = 23 \text{ мм.}$$

Из основания a опустим прямую образующую прямой угол к основанию b. Получаем прямоугольный треугольник имеющий стороны hтр = 23 *мм*.,

$$\text{и сторону } c = \frac{b - a}{2} = \frac{14 - 10}{2} = 2 \text{ мм.}$$

В прямоугольном треугольнике квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов. Катет hтр = 23 *мм*., катет c = 2 *мм*. Отсюда длина боковой стороны (гипотенузы):

$$L\text{бок} = \sqrt{23^2 + 2^2} = \sqrt{529 + 4} = 23{,}086 \approx 23{,}1 \text{ мм.}$$

Две боковые стороны трапеции соответственно 23,1 × 2 = 46,2 *мм*. Периметр паза:

стороны трапеции 46,2 + верх. основание трап. 10 + полуокружность 22 = 78,2 *мм*.

Применим изоляцию гильзы толщиной 0,27 + 0,27 = 0,54 *мм*. клин пазовый ширина 9 *мм*., толщина 1,5 *мм*., что займет 9 × 1,5 = 13,5 $мм^2$, прокладка межфазная пазовая толщиной 0,4 *мм*., шириной 30 *мм*.. что займет 30 × 0,4 = 12 $мм^2$.
Изоляция пазовой коробки (гильзы) соответственно согласно периметра паза займет:

$$0{,}54 \times 78{,}2 = 42{,}228 \approx 42{,}3 \; мм^2$$

Площадь паза ранее посчитанная 353 $мм^2$. Оставшаяся площадь паза после изолирования:

Sпиз = 353 – (гильза 42,3 $мм^2$ + клин 13,5 $мм^2$ + прокладка 12 $мм^2$) = 285,2 $мм^2$

Что составляет 285,2/353 = 0,807, то есть примерно 20% занимает изоляция и клин. Точный подсчет важен в особенности для удаленной задачи расчета, когда расчетчик не находится рядом с двигателем. И при этом, еще раз заметим, крайне важно получить точные данные обмера статора, паза. Практика ремонта показывает, что пазовая изоляция всыпных обмоток занимает примерно 15 – 20% от всей площади голого паза. Зависит от формы паза и их количества. Так например при 48 пазах размер паза очевидно меньше чем при 36 при сопоставимом диаметре статора и одинаковых требованиях к толщине изоляции. Для приближенного подсчета площади паза оставшейся после изолирования можно использовать эти цифры, тем более если есть возможность проверить практически заполнение паза проводниками перед намоткой обмотки. То есть подсчитанную площадь не изолированного паза нужно умножить на 0,85 – 0,8, получив оставшееся пространство после изолирования. Типичные толщины изоляции низковольтных электродвигателей (до 690 вольт) приведены в таблице 7, 8, 9.

11. Типичные толщины пазовой изоляции.

Таблица 7. Изоляция пазовая всыпной статорной обмотки асинхронного двигателя.

высота оси вращения 50 – 132 *мм*.		
	1 коробка пазовая	0,2 – 0,25 *мм*.
	2 крышка пазовая	0,25 – 0,35 *мм*.
	прокладка межфазная в лобовой части обмотки	0,35 *мм*.
	изоляция внутримашинных соединений	трубка типа ТКСП
	бандаж лобовых частей	нить полиэфирная крученая или стеклянная
	пропитка лак типа	КО916
	покрытие лобовых частей	эмаль типа ГФ

высота оси вращения 160 – 250 *мм*.		
	1 коробка пазовая	0,37 – 0,4 *мм*.
	2 крышка пазовая	0,5 *мм*.
	3 прокладка межслойная	0,37 – 0,5 *мм*.
	4 прокладка под клин	0,5 *мм*.
	5 клин пазовый	
	прокладка межфазная в лобовой части обмотки	0,37 – 0,4 *мм*.
	изоляция внутримашинных соединений	трубка типа ТКСП
	бандаж лобовых частей	нить стеклянная
	пропитка лак	КО916, ПЭ993
	покрытие лобовых частей	эмаль типа ЭП91

высота оси вращения 280 – 355 *мм*.		
	1 коробка пазовая	0,6 – 0,65 *мм*.
	2 прокладка под клин	0,5 *мм*.
	3 прокладка межслойная	0,4 – 0,5 *мм*.
	4 клин пазовый	
	5 прокладка на дно паза	0,5 *мм*. (стеклотекстолит)
	прокладка межфазная в лобовой части обмотки	0,45 *мм*.
	изоляция внутримашинных соединений	трубка типа ТКСП и стеклоткань
	бандаж лобовых частей	лента стеклянная или лавсановая тафтяная
	привязка межфазных прокладок	нить стеклянная
	пропитка лак	КО916, КО964
	покрытие лобовых частей	эмаль типа ЭП91

Применяемые изоляционные материалы приведены в справке [53].

Таблица 8. Рекомендации толщин изоляционных гильз (коробка пазовая) в зависимости от мощности.

P, квт	толщина гильз, *мм*.	*P, квт*	толщина гильз, *мм*.
до 1	0,2	60 – 80	0,4
1 – 3	0,25	80 – 110	0,4
3 – 5	0,27	110 – 140	0,5
5 – 10	0,27	140 – 170	0,5
10 – 15	0,3	170 – 200	0,6
15 – 25	0,35	200 – 250	0,6
25 – 40	0,35	250 – 300	0,8
40 – 60	0,4	300 – 400	0,8

Таблица 9. Толщины пазовой изоляции электродвигателей АИР.

высота оси вращения, *мм*.	толщина изоляции, *мм*.
45 – 80	0,2
90 – 132	0,3
160 – 250	0,4
280 – 355	0,5

высота оси вращения, *мм*.	толщина пазовой крышки, не менее, *мм*.
45 – 80	0,3
90 – 100	0,35
112 – 132	0,4
160 – 250	0,5

12. Расчет заполнения паза проводниками.

Аккуратный расчет заполнения паза проводниками является важным этапом расчета восстановления обмотки электродвигателя. Важно точно измерить размеры паза, подсчитать сечение просвета паза. По сечению витка определяется плотность тока в обмотке на один миллиметр квадратный сечения витка, затем произведением плотности тока на линейную нагрузку получается условная цифра фактора нагрева показывающая правильность расчета в целом. Математический расчет нагрева двигателя сложен и приводится в литературе по конструированию электродвигателей. Однако в ремонтной практике достаточно ориентироваться на величину фактора нагрева $\Delta t°C$. Рекомендованные значения известны из практики постройки большого количества электродвигателей.
На рисунке 12 приведено расположение проводников, *а* – идеальное, плотно упакованное расположение витков, достижимое в катушках трансформаторов, реле, в некоторых специальных электродвигателях, *б* – положение проводников принимаемое в расчете, *в* – реальное, хаотичное положение проводников всыпной обмотки в пазе электродвигателя.

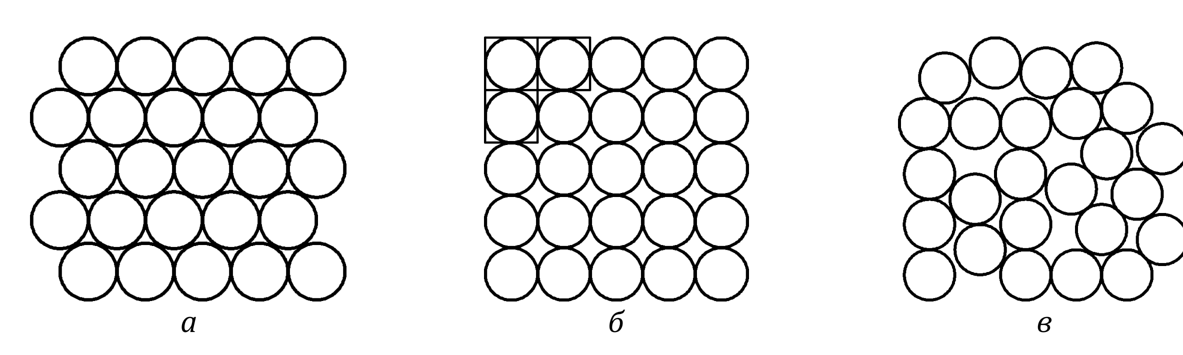


Рис. 12. Расположение круглых проводников в просвете пазе.
а – идеальное расположение, *б* – расположение проводников принимаемое при расчете.
в – реальное расположение проводников.

Количество витков и проводников из которых состоит в пазе виток ранее подсчитано исходя из предполагаемых электромагнитных нагрузок. Диаметр проводника, провода или проводников, при разделении витка на несколько параллельных, подсчитывается исходя их оставшегося пространства паза после изолирования. При этом принимают в расчете положение проводников как на рисунке 12 *б*. Однако учитывая не предсказуемое и хаотичное заполнение паза, как на рисунке 12 *в*, оставшееся расчетное пространство уменьшают еще на 28 – 25%, значение сечения свободного пространства паза умножают на 0,72 – 0,75, это типичная цифра, возможно некоторое отклонение от этого значения, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения.

☞ $$d\text{из} = \sqrt{\frac{S\text{пиз} \times k\text{п}}{w\text{п} \times n}} \qquad \text{обратная проверка: } k\text{п} = \frac{d_{\text{из}}^2 \times w\text{п} \times n}{S\text{пиз}}$$

где dиз – диаметр изолированного одинарного проводника, *мм*., Sпиз – сечение просвета паза оставшееся после изолирования пазовой изоляцией и клина, *мм*^{2}., kп – коэффициент заполнения паза 0,75, wп – количество витков обмотки в пазе, n – количество параллельных проводников в витке.
В электромашиностроении в справочных, обмоточных данных, диаметр, размер проводников всегда указывается по голой меди и иногда дополнительно с изоляцией с уточнением марки провода.

Пример. Сечение просвета паза электродвигателя 110 *квт*. составляет 353 *мм*². После расчетного изолирования, при толщине пазовой коробки 0,27 + 27 *мм*., клин 9 × 1,5 *мм*., прокладка межфазная пазовая 30 × 0,4 *мм*., оставшееся пространство для размещения проволок составило 285,2 *мм*². Далее, учитывая беспорядочное расположение проводников это значение умножим на 0,75, получим 285,2 × 0,75 = 213,9 *мм*².
В этом пространстве расчетное расположение проводников принимается как на рисунке 12 *б*, каждый проводник занимает квадрат описанный вокруг круглого проводника.
По расчету для двигателя в пазе находится 12 витков, таким образом площадь квадратика, см. рисунок *б*, для одного витка:

$$\frac{213{,}9\ \text{мм}^2}{12} = 17{,}83\ \text{мм}^2.$$

Отсюда диаметр провода с изоляцией:

$$\sqrt{17{,}83} \approx 4{,}22\ \text{мм}.$$

Но такого обмоточного провода нет, во всяком случае такой диаметр провода не применим для всыпной обмотки, необходимо учитывать не только доступность номинала провода, но и возможность и удобство укладки. Поэтому часто виток в электродвигателях разделяют на несколько параллельных проводников. По этой же причине устраивают параллельные ветви в фазе.
Примем виток из 7 параллельных проводников. В таком случае в пазе будет 12 витков × 7 = 84 проволоки. Площадь занимаемая одной проволокой:

$$\frac{213{,}9}{12\ \text{витков в пазе} \times 7\ \text{проводов в витке}} = \frac{213{,}9}{84} = 2{,}547\ \text{мм}^2.$$

и ее диаметр:

$$d\text{из} = \sqrt{2{,}547} = 1{,}595\ \text{мм}.$$

Обратите внимание, это диаметр провода с изоляцией!
Ближайший номинал эмалированного обмоточного провода 1,5 *мм*. его диаметр с изоляцией *d*из = 1,606 *мм*. Таким образом виток выполняется проводом 1,5 *мм*. × 7.
Можно испробовать принять виток из 6 проводов, тогда площадь просвета занимаемая одним параллельным проводником:

$$\frac{213{,}97}{12\ \text{витков} \times 6\ \text{проводов}} = \frac{213{,}97}{72} = 2{,}547\ \text{мм}^2.$$

и его диаметр с изоляцией:

$$d\text{из} = \sqrt{2{,}971} = 1{,}723\ \text{мм}.$$

Ближайший номинал эмалированного провода 1,6 *мм*. с диаметром изоляцией *d*из = 1,706 *мм*. Таким образом виток выполняется 1,6 *мм*. × 6 проводов в витке. Во всех случаях расчета учитывается изоляция обмоточного провода. Полученное значение – это диаметр провода с изоляцией. Для поиска подходящего диаметра следует пользоваться справочной таблицей номиналов проводов. Следует рационально подбирать диаметр провода. Использование чрезмерного множества параллельных проводников в витке не только ухудшает заполняемость паза медью, так как изоляция проводников так же занимает место, но и стоимость обмоточной меди возрастает с уменьшением диаметра провода.

Не следует применять виток, в данном примере, например из 0,85 *мм*. × 20, это не удобно не только технологически, придется мотать витки сразу с 20 катушек провода, но не верно и экономически.
Проверим правильность коэффициента заполнения kп = 0,75 обратным подсчетом. Принято 12 витков в пазе, при этом виток состоит из 7 параллельных проводников, то есть всего в пазе 84 проволок диаметром 1,5 *мм*, при этом диаметр с изоляцией dиз = 1,606 *мм*. Площадь занимаемая одним проводником: $1{,}606^2$ = 2,579 *мм*^{2}., а все: 2,579 *мм*^{2} × 84 = 216,65 *мм*^{2}. Коэффициент заполняемости:

$$k\text{п} = \frac{d_{\text{из}}^2 \times w\text{п} \times n}{S\text{пиз}} = \frac{1{,}606^2 \times 12 \times 7}{285{,}2} = \frac{216{,}65}{285{,}2} = 0{,}759 \approx 0{,}76$$

что близко к принятой цифре 0,75, здесь 285,2 *мм*^{2} – пространство паза за вычетом изоляции, цифра приведена выше.
Для варианта 1,6 *мм*. × 6, где диаметр с изоляцией dиз = 1,706 *мм*., 12 витков × 6 = 72 проволоки в пазе:

$$k\text{п} = \frac{d_{\text{из}}^2 \times w\text{п} \times n}{S\text{пиз}} = \frac{1{,}706^2 \times 12 \times 6}{285{,}3} = \frac{1{,}706^2 \times 72}{285{,}3} = \text{коэффициент заполнения } 0{,}734$$

что так же близко к 0,75. Правильно будет проверить расчетное заполнение перед намоткой катушек обмотки в натуре, практически заполнив паз нарезав соответствующее количество проводов небольшой длины и отнеся этот расход меди к стоимости ремонта.
Следует заметить, что коэффициент kп заполнения паза может иметь значение примерно от 0,67 до 0,78. Меньшее значение для электродвигателей старых серий, где плотность заполнения меньше, чем в современных электродвигателях. Паз должен быть заполнен полностью. Не полный паз указывает на ошибочность расчета обмотки, на брак фабричный или предидущего ремонта. И в то же время не следует значительно и упорно уплотнять проводники в пазе при укладке. При этом возрастает вероятность повреждения изоляции проводников, ухудшается затекаемость лака при пропитке. Пропиточный лак не только удерживает обмотку, но и является проводником тепла от обмотки к корпусу машины. Лак более лучший проводник тепла чем воздух оставшийся между проводниками в пазе, тем также важна тщательность пропитки обмотки. Толщины пазовой изоляции зависят от напряжения, высоты оси вращения (мощности), следует выбирать в соответствии с рекомендациями технологии выполнения ремонта.
Пример. Паз электродвигателя 11 *квт*. имеет сечение просвета паза 143 *мм*^{2}. Оставшееся пространство за вычетом изоляции 118 *мм*^{2}. Расчетом в пазе определено 29 витков (однослойная обмотка). Примем виток в два параллельных проводника, n = 2, тогда диаметр провода с изоляцией:

$$d\text{из} = \sqrt{\frac{S\text{пиз} \times k\text{п}}{w\text{п} \times n}} = \sqrt{\frac{118 \times 0{,}75}{29 \times 2}} = \sqrt{\frac{88{,}5}{58}} = 1{,}235 \text{ мм.}$$

выбираем эмалированный провод 1,12 *мм*., с диаметром с изоляцией dиз = 1,217 *мм*.
Обратная проверка коэффициента заполнения:

$$k\text{п} = \frac{d_{\text{из}}^2 \times w\text{п} \times n}{S\text{пиз}} = \frac{1{,}217^2 \times 29 \times 2}{118} = \text{коэффициент заполнения } 0{,}727 \approx 0{,}73$$

что близко к 0,75 и выбор диаметра и количества параллельных проводников верен.

Наглядно заполняемость паза в процентах, если принять коэффициент 0,75 как 100 процентов, для приведенного примера:

$$\frac{0{,}73}{0{,}75} \times 100 = 97{,}3\%$$

В процентном отношении видение заполнения может быть полезно при расчете двигателя с двумя обмотками и более, распределение свободного сечения паза между обмотками.
Если бы предполагалось выполнять виток в один провод, в этом примере, то расчетный диаметр его должен был быть с изоляцией 1,746 *мм*. При этом ближайший 1,6 *мм*. с изоляцией 1,706 *мм*. или 1,7 *мм*. диаметр с изоляцией 1,809 мм. Выполнить обмотку проводом 1,6 *мм*. в двигателе 11 *квт*. практически несколько затруднительнее, хотя сечение витка при этом немного больше, что лучше и меди в пазе больше, чем 1,12 *мм*. × 2. В общем во всыпных обмотках провода диаметром более чем 1,8 *мм*. не применяются, размер диаметра также ограничен шириной шлица паза, который желателен наименьшего возможного размера в конструкции электродвигателя. В выборе количества параллельных проводников в витке и их ориентировочный диаметр, в зависимости от мощности, следует обращаться к справочным обмоточным данным серий электродвигателей. В двигателях мощностью более нескольких киловатт, для удобства использования диаметров и параллельных проводников в витке устраиваются параллельные ветви в фазе.
Не редкость, когда в витке состоящего из параллельных проводников, их диаметры не одинаковы. Например, для лучшего заполнения медью паза можно подсчитать использование для предыдущего примера виток в два провода 1,12 + 1,18 *мм*.
В таком случае подсчет занимаемой площади просвета паза выполняется для каждого проводника отдельно. Диаметр провода 1,12 *мм*., с изоляцией 1,217 *мм*. Занимаемая площадь:

$$1{,}217^2 \times 29 \text{ витков} = 42{,}951\ мм^2.$$

Для провода 1,18 *мм*., с изоляцией 1,279 *мм*. занимаемая расчетная площадь:

$$1{,}279^2 \times 29 \text{ витков} = 47{,}439\ мм^2.$$

$$\text{сумма: } 42{,}951 + 47{,}439 = 94{,}878\ мм^2.$$

коэффициент заполнения:

$$k\text{п} = \frac{94{,}878}{118} = 0{,}804$$

что более чем 0,75. То есть подсчет показывает что 29 витков 1,12 + 1,18 *мм*., в пазе не помещаются. Все же возможно что проводники уместятся, необходимо практическое опробывание или при этом придется уменьшать толщины пазовой изоляции выбрав более надежный современный и более дорогостоящий изоляционный материал.

Пример. Паз электродвигателя 1,1 *квт*. имеет сечение просвета паза 56,2 $мм^2$. Оставшееся пространство за вычетом изоляции 43,8 $мм^2$. Расчетом в пазе определено 73 витка, виток в одинарный проводник. Диаметр провода с изоляцией:

$$d\text{из} = \sqrt{\frac{43{,}8 \times 0{,}75}{73}} = 0{,}6708 \text{ мм.}$$

Ближайший эмалированный провод диаметром 0,6 *мм*., с изоляцией dиз = 0,674 *мм*. Обратная проверка коэффициента заполнения:

$$k\text{п} = \frac{0{,}674^2 \times 73}{43{,}8} = \frac{33{,}162}{115{,}7} = 0{,}757$$

Справка по обмоточным круглым проводам приведена в списке литературы [20].

13. Плотность тока в обмотке.

Плотность тока в обмотке, точнее в витке $A/мм^2$ (ампер на миллиметр квадратный) является важным параметром. Величина получается делением фазного тока, тока протекающего в витках фазы, на сечение витка. Ток фазный при соединении:

$$\text{соединение } \triangle: \; I\text{ф} = \frac{P\text{квт} \times 1000}{3 \times U_{\triangle} \times \eta \times cos\varphi} \qquad \text{соединение Y}: \; I\text{ф} = \frac{P\text{квт} \times 1000}{\sqrt{3} \times U_{Y} \times \eta \times cos\varphi}$$

Pквт – паспортная мощность электродвигателя, U_Y, $U_{\triangle}$ – напряжение при соединении треугольник, звезда, η – *кпд*, коэффициент полезного действия, не смотря на то, что в некоторых документах принято указывать *кпд* в процентах, для расчетов это не удобно, в уравнение указывается эквивалент значения меньше единицы, (например 90% как 0,9, 86% как 0,86 и. т. п.), *cosφ* – косинус "фи".

Пример:

$$I\text{ф} = \frac{P\text{квт} \times 1000}{3 \times U_{\triangle} \times \eta \times cos\varphi} == \frac{11 \text{ квт} \times 1000}{3 \times 220 \times 0{,}88 \times 0{,}9} = 21{,}043 \; A$$

$$I\text{ф} = \frac{P\text{квт} \times 1000}{\sqrt{3} \times U_{Y} \times \eta \times cos\varphi} = \frac{11 \times 1000}{1{,}732 \times 380 \times 0{,}88 \times 0{,}9} = 21{,}043 \; A$$

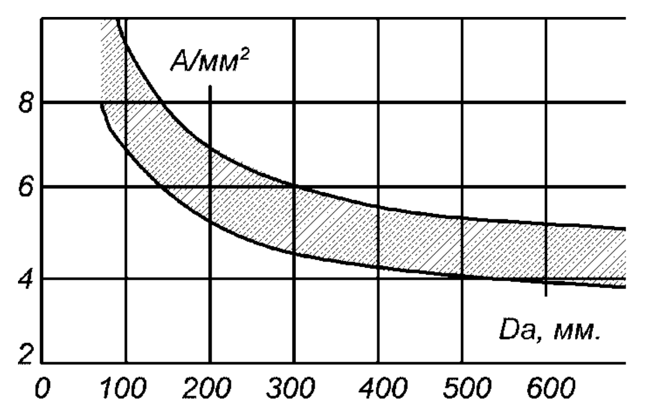
Или также ток фазный это ток наименьший по паспорту машины при соединение треугольник/звезда. Плотность тока в обмотке:

$$J = \frac{I\text{ф}}{S\text{пр} \times n \times a} = \frac{I\text{ф}}{Sw \times a} \quad A/\text{мм}^2$$

*I*ф – фазный ток, *A*, *S*пр – сечение проводника в витке (если их несколько), *n* – количество параллельных проводников в витке, *Sw* – сечение витка, *a* – параллельных ветвей в фазе. Пример. Виток обмотки состоит из 2 параллельных проводников *d* = 1,12. Сечение одной проволоки 0,9852 $мм^2$., сечение витка в таком случае 0,9852 × 2 = 1,9704 $мм^2$. Ток фазный как в предидущем примере, параллельных ветвей фазы *a* = 2.
Плотность тока:

$$J = \frac{I\text{ф}}{Sw \times a} = \frac{21{,}043}{1{,}9704 \times 2} = 5{,}339 \; A/\text{мм}^2$$

☞ В некоторых публикациях по расчету обмотки при ремонте предлагается выбирать сечение витка обмотки по плотности тока от соответствующей мощности, что категорически не верно. Величина плотности тока действительно имеет рост при снижении мощности электродвигателя и при конструировании двигателя приближенно задается. Но сравнение данных множества электродвигателей показывает, что плотность тока например при 5,5 *квт* и 30 *квт* может быть одинакова.



Поэтому плотность тока определяется при расчете заполнением паза проводниками, а не выбирается, в ином случае высока вероятность ошибки определения правильности расчета. На картинке примерная плотность тока от внешнего диаметра статора.

14. Коэффициент полезного действия и косинус фи.

Кпд и *cosφ* при ремонте прямо подставляют в расчет исходя из мощности и полюсности электродвигателя. Также сведения можно прямо брать в справочных данных серийных электромоторов или с паспорта электромотора, если он не вызывает сомнений.

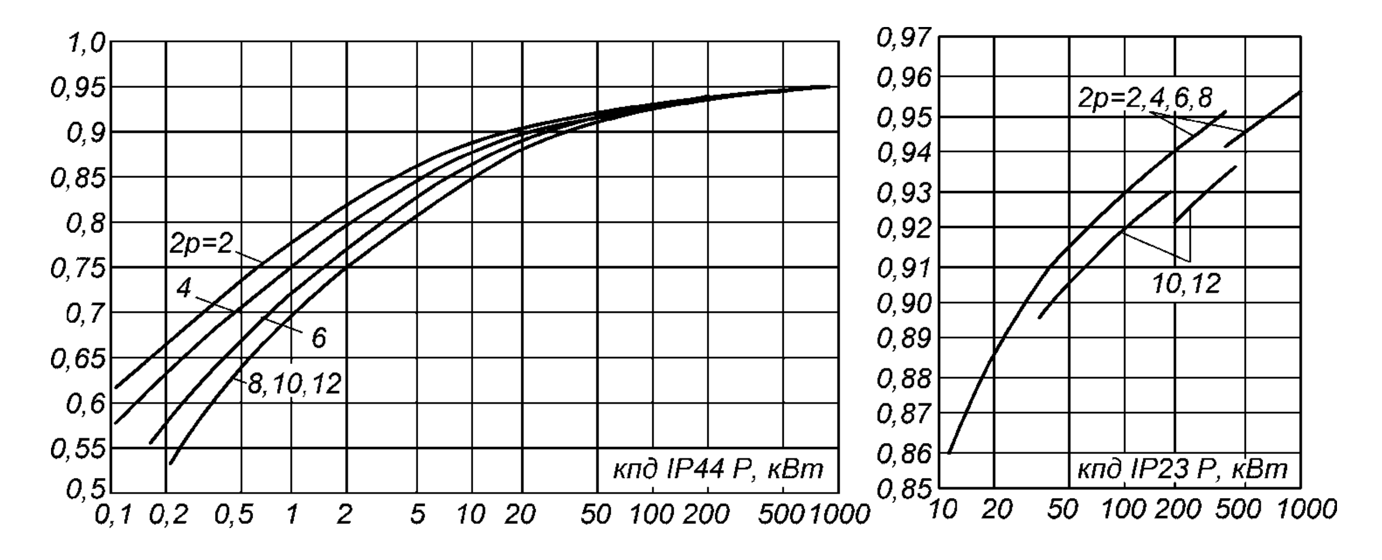


Рис. 13. Коэффициент полезного действия для IP44 и IP23.

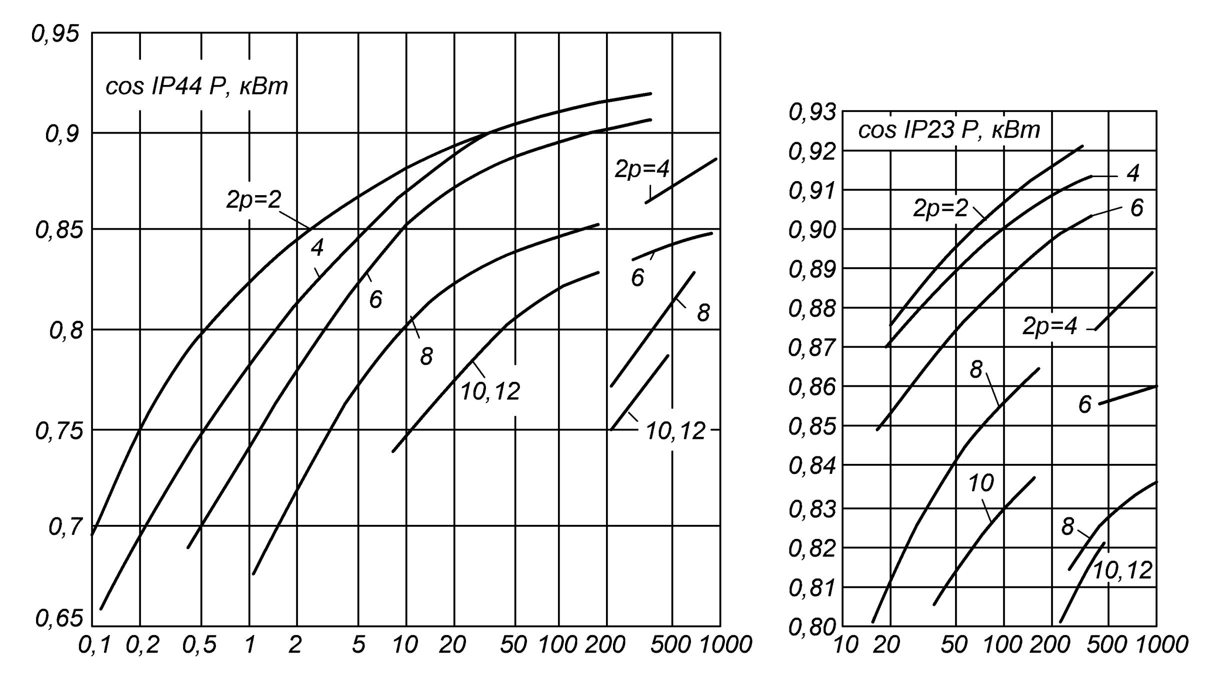


Рис. 14. *cosφ* для IP44 и IP23.

КПД и косинус фи электродвигателей в зависимости от энергоэффективности различных зарубежных производителей и ГОСТ [51, 52]

15. Линейная нагрузка.

Линейная нагрузка – условное значение, линейная нагрузка представляет собой произведение силы тока в витке (проводнике) на число проводников на 1 *см*. длины окружности расточки статора. Является одним из основных параметров при указании технических данных электродвигателей и составляющей фактора нагрева $\Delta t°C$, выражается следующим уравнением:

$$AS = \frac{10 \times w\text{п} \times Z \times I\text{ф}}{\pi \times Di \times a}\ A/\text{см}.$$

AS – линейная нагрузка, $A/см$., wп – витков в пазе, Z – количество пазов статора, Iф – ток фазный, π – "пи", число "пи" = 3,14159, Di – диаметр расточки статора, *мм*., 10 – число десять, множитель, так как диаметр расточки в *мм*., а нужное значение в *см*., ампер на сантиметр, a – количество параллельных ветвей в фазе.

Пример. Витков в пазе wп = 29, пазов статора Z = 36, ток фазный Iф = 21,043 A, внутренний диаметр статора Di = 127 *мм*., параллельных ветвей в фазе a = 2.

$$AS = \frac{10 \times w\text{п} \times Z \times I\text{ф}}{\pi \times Di \times a} = \frac{10 \times 29 \times 36 \times 21{,}043}{3{,}14159 \times 127 \times 2} = \frac{219688{,}92}{797{,}96386} = 275{,}311\ \approx 275\ A/\text{см}.$$

Другие формулы:

$$AS = \frac{10 \times I\text{ф} \times w\text{п}}{tz \times a} \quad \text{где пазовое деление: } tz = \frac{\pi \times Di}{Z}$$

$$AS = \frac{I\text{ф} \times w\text{п}}{tz \times a} = \frac{10 \times 21{,}043 \times 29}{11{,}082 \times 2} = \frac{6102{,}47}{22{,}16} = 275{,}382\ \approx 275\ A/\text{см}.$$

и

$$AS = \frac{10 \times m \times q \times I\text{ф} \times w\text{п}}{\tau \times a} \quad \text{где полюсное деление: } \tau = \frac{\pi \times Di}{2p}$$

от витков фазы:

$$AS = \frac{10 \times 2 \times m \times w\text{ф} \times I\text{ф}}{\pi \times Di\ \times a}$$

$$AS = \frac{10 \times 2 \times m \times w\text{ф} \times I\text{ф}}{\pi \times Di\ \times a} = \frac{10 \times 2 \times 3 \times 174 \times 21{,}043}{3{,}14159 \times 127 \times 2} = \frac{219688{,}92}{797{,}96386} = 275{,}311$$

m – количество фаз, wп – витков в пазе, wф – витков в фазе, q – пазов на полюс и фазу, a – параллельных ветвей в фазе.

Средние значения AS в зависимости от внешнего диаметра статора Da, *мм*., полюсности и класса защиты IP23 или IP44 приведены далее на рисунке 15.

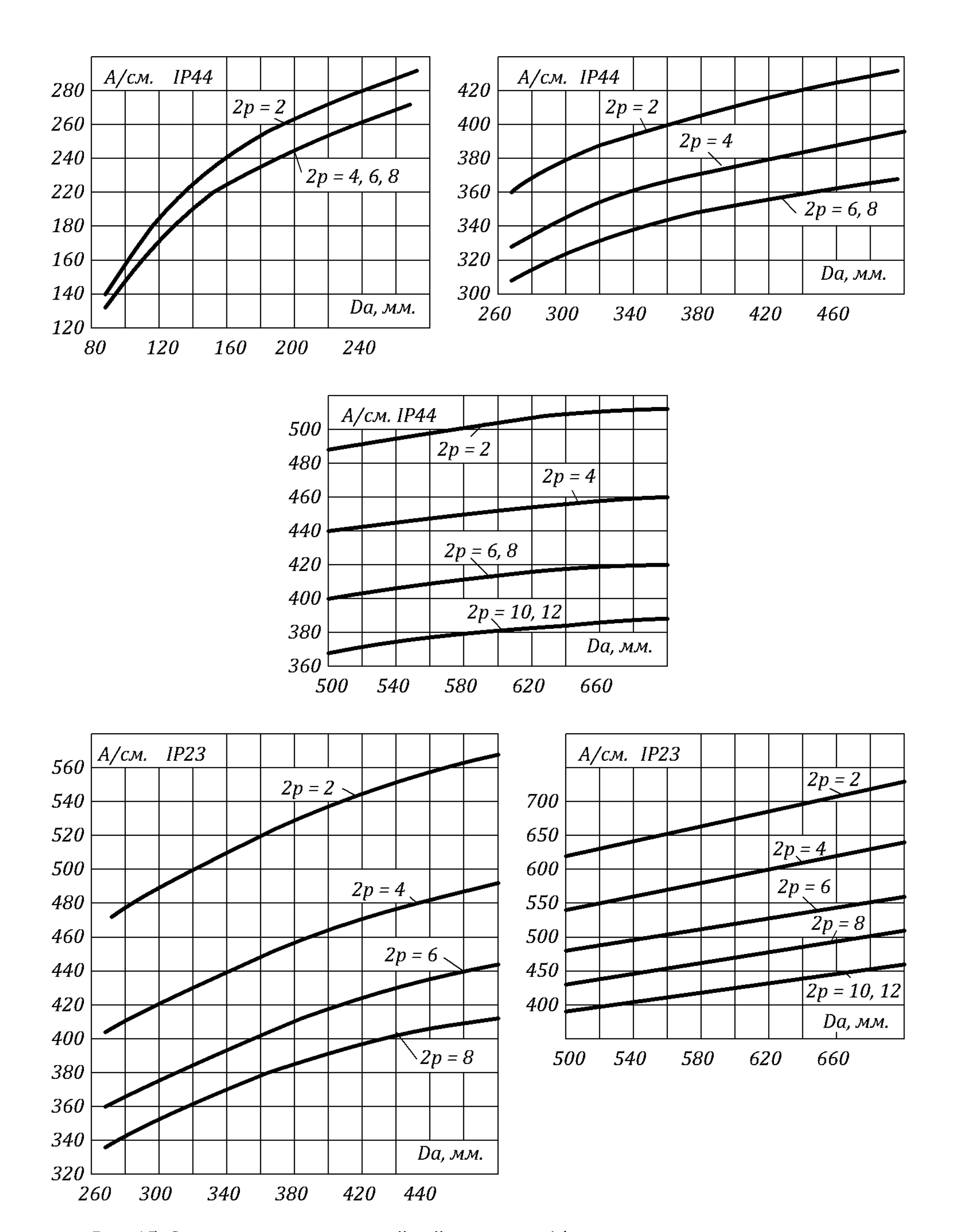


Рис. 15. Средние значения линейной нагрузки *A/см.* в зависимости от внешнего диаметра, количества полюсов и степени защиты IP23 или IP44.

16. Фактор нагрева.

Тепловой расчет электродвигателя возможен, но объем расчета непомерно велик и включает в себя сведения которые не доступны при ремонте. Тем не менее оценить нагрев возможно согласно накопленному опыту постройки электродвигателей. Мощность электродвигателя ограничена нагревом. На правильность теплового баланса электродвигателя указывает параметр называемый коэффициентом перегрева Δt^oC. В литературе встречается так же иные названия, коэффициент нагрева, фактор пропорциональности перегрева. Значение фактора нагрева получается умножением линейной нагрузки на плотность тока. Линейная нагрузка – количество ампер-проводов на сантиметр длины окружности расточки статора $A/см$. Плотность тока – сила тока в амперах приходящиеся на один квадратный миллиметр сечения витка, $A/мм^2$.
Ориентировочно, для закрытых обдуваемых электродвигателей (IP44) средне–максимальное составляет около 2000 – 2200. Зависит от мощности, полюсности, влияет так же однослойная или двухслойная обмотка. Типичные значения приведены в литературе расчета электродвигателей. Практически, при расчете обмотки при ремонте сравнивают с аналогичными значениями приведенными в справочниках по электродвигателям, например серии 4А.

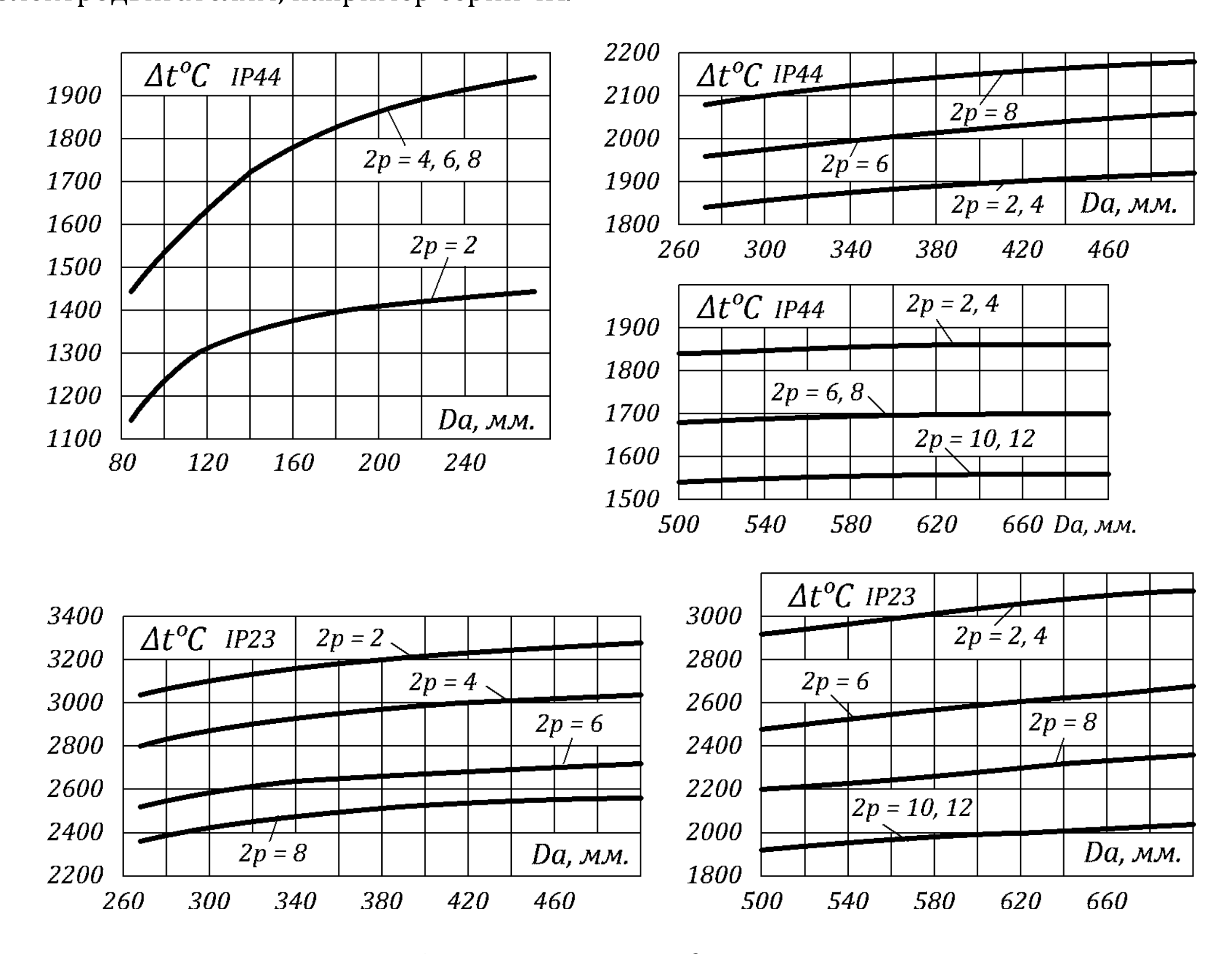


Рис. 16. Средние значения фактора нагрева Δt^oC асинхронных двигателей до 660V, IP44 и IP23 с обдувом вентилятором на валу при внешнем диаметре статора Da, $мм$. и изоляции класса F (155°C)

В итоговом расчете электродвигателя Δt^oC сравнивается с имеющимися данными.
Фактор нагрева:

$$\Delta t^oC = AS \times J$$

AS – линейная нагрузка, $A/см.$, J – плотность тока в обмотке, $A/мм^2$.
Подсчет линейной нагрузки и плотности тока дан ранее.

Полученный фактор нагрева позволяет оценить правильность расчета при ремонте. Если полученное значение Δt^oC выходит за пределы средних или практических значений, а индукции, линейная нагрузка, плотность тока находятся в средних допустимых и рекомендованных пределах то это означает что двигатель не может нести указанную мощность. Так может случится не только при ошибках в расчете, но и при недостоверной указанной мощности в паспорте электродвигателя. На рис. 16 даны средние значения фактора нагрева, так же следует прямо обращаться к справочным данным известных электродвигателей [43, 47].

17. Весовой подсчет и сопротивление обмотки.

Расчет веса обмотки основан на расчете длины проводников, вычислении длины лобовой части и сумме длин проводников лежащих в пазах. Одно зубцовое деление катушки, *мм*. см. рисунок 17:

$$tz\text{к} = \frac{\pi \times (Di + hz)}{Z}$$

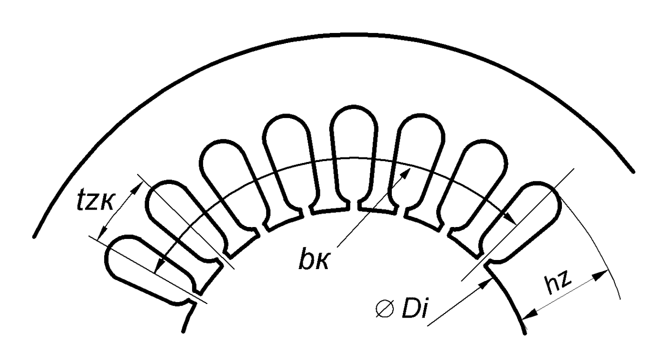


Рис. 17. К определению средней ширины катушки.

где π – число "пи" (3,14159), Di – внутренний диаметр статора, *мм*., hz – высота паза, *мм*., Z – количество пазов.
Ширина катушки, *мм*.:

$$b\text{к} = tz\text{к} \times y$$

где y – принятый шаг обмотки. Так же:

$$b\text{к} = \frac{\pi \times (Di + hz) \times \beta}{2p} \quad \text{или} \quad b\text{к} = \frac{\pi \times (Di + hz) \times \frac{y\text{к}}{y}}{2p}$$

где bк – ширина катушки, *мм*., Di – внутренний диаметр статора, *мм*. $2p$ – количество полюсов, β – величина сокращения шага, y – полный шаг, yк – принятый (укороченный).
Средняя длина одной лобовой части, с учетом расстояния выхода катушки из паза *мм*.:

$$L\text{л} = (1{,}16 + 0{,}14 \times p) \times b\text{к} + 15$$

где p – пар полюсов.
Длина одного витка обмотки, *мм*.:

$$Lw = (L\text{л} + L) \times 2$$

где L – длина статора, *мм*.
Далее подсчет удобнее вести в метрах, значения Lw в *мм*. необходимо разделить на 1000, смотрите дальнейшие примеры. Общая длина одной фазы (всех витков фазы), *метров*:

$$L\text{ф} = Lw \times w\text{ф}$$

где Lф – длина обмотки одной фазы, Lw – длина витка (одного), wф – витков фазы. Общая длина всего провода на электродвигатель, на три фазы соответственно:

$$L\text{пм} = Lw \times w\text{ф} \times m \times n$$

где Lпм – общая длина всех проводников мотора, m – количество фаз, n – проводников в витке.

Вес всей обмотки:

$$G\text{о} = G\text{из} \times L\text{пм}$$

где Gо – вес обмотки двигателя, Gиз – вес изолированного проводника, берется из справочной таблицы весов обмоточных проводов, (*кг/км* или *кг/м*)., Lпм – длина обмоточного провода всей обмотки (всех проводов).

Важное замечание. При разных диаметрах проводников в витке весовой подсчет делается раздельно для каждого проводника, а затем суммируется. При этом в формулы весового подсчета подставляются данные каждого проводника отдельно.
Сопротивление одной фазы постоянному току:

$$R\text{ф} = \frac{\rho \times L\text{ф}}{Sw \times a^2}$$

где ρ – удельное сопротивление металла проводника, медь 0,0175 (*Ом×мм²/м.* при 20°C), Lф – длина обмотки одной фазы, *м.*, Sw – сечение витка, *мм²* (сумма сечений всех проводов в витке), a – количество параллельных ветвей в фазе, значение в квадрате.

Пример. Статор Di = 72 *мм.*, L = 60 *мм.*, высота паза hz = 12 *мм.*, пазов статора Z = 24, шаг обмотки y = 10 (1 – 11), витков в фазе wф = 320 (в пазе 80), провод d = 0,63 *мм.* × 1, a = 1, полюсов $2p$ = 2.
Зубцовое деление:

$$tz\text{к} = \frac{\pi \times (Di + hz)}{Z} = \frac{\pi \times (72 + 12)}{24} = 10{,}995 \text{ мм.}$$

ширина катушки:

$$b\text{к} = tz\text{к} \times y = 10{,}995 \times 10 \approx 110 \text{ мм.}$$

или

$$b\text{к} = \frac{\pi \times (Di + hz) \times \beta}{2p} = \frac{\pi \times (72 + 12) \times \frac{10}{12}}{2} \approx 110 \text{ мм.}$$

где β величина сокращения шага, сокращенный шаг y = 10, полный $y = Z/2p$ = 12, величина укорочения шага 10/12 = 0,8333, Di – внутренний диаметр статора, hz – высота (глубина) паза. Длина лобовой части:

$$L\text{л} = (1{,}16 + 0{,}14 \times p) \times b\text{к} + 15 = (1{,}16 + 0{,}14 \times 1) \times 110 + 15 = 158 \text{ мм.}$$

длина одного витка обмотки:

$$Lw = 2 \times (158 + 60) = 436 \text{ мм.}/1000 = 0{,}436 \text{ метров.}$$

Далее подсчет удобнее продолжать в метрах. Длина одной фазы (всех витков фазы), *метров*:

$$L\text{ф} = Lw \times w\text{ф} = 0{,}436 \times 320 = 139{,}52 \text{ м.}$$

здесь же удобнее подсчитать сопротивление одной фазы постоянному току:

$$R\text{ф}_{20} = \frac{\rho \times L\text{ф}}{Sw \times a^2} = \frac{0{,}0175 \times 139{,}52}{0{,}31172 \times 1^2} = \frac{2{,}604}{0{,}31172} = 7{,}8326 \text{ Ом}$$

где ρ – удельное сопротивление металла проводника, медь 0,0175 (*Ом×мм²×м.* при 20°C), Lф – длина обмотки одной фазы, *м.*, Sw – сечение витка (сумма сечений всех проводов в витке), *мм²*., a – количество параллельных ветвей в фазе, если параллельных ветвей нет, то a = 1.

Общая длина провода на электродвигатель, на три фазы соответственно:

$$L\text{пм} = Lw \times w\text{ф} \times m \times n = 0{,}436 \times 320 \times 3 \times 1 = 418{,}56 \text{ метров}$$

где m – количество фаз, n – проводников в витке.
Вес провода диаметром 0,63 с изоляцией типа ПЭТ155 – 1 *гр./м.* = 2,8723 (или это же вес 1 *км.* в *кг.*) соответственно вес всего обмоточного провода двигателя составит:

$$G\text{о} = G\text{из} \times L\text{пм} = 2{,}8723 \times 418{,}56 = 1202{,}23 \text{ грамм или} \sim 1{,}202 \text{ кг.}$$

или

$$G\text{о} = 2{,}8723 \times 0{,}41856 \text{ км.} \approx 1{,}202 \text{ кг.}$$

где Gо – вес обмотки двигателя, Gиз – вес изолированного проводника (из справочной таблицы обмоточных проводов), Lпм – длина обмоточного провода всей обмотки (всех проводов).

Пример. Di = 73 *мм.*, L = 67 *мм.*, высота паза hz = 13,5 *мм.*, Z = 24, шаг y = 10 (1 – 11), витков в фазе wф = 312 (в пазе 78), провод 0,72 *мм.* × 1 проводник в витке, параллельных ветвей a = 1, полюсов $2p$ = 2.

$$tz\text{к} = \frac{\pi \times (Di + hz)}{Z} = \frac{\pi \times (73 + 13{,}5)}{24} = 11{,}322 \text{ мм.}$$

$$b\text{к} = tz\text{к} \times y = 11{,}322 \times 10 = 113{,}22 \text{ мм.}$$

длина лобовой части:

$$L\text{л} = (1{,}16 + 0{,}14 \times p) \times b\text{к} + 15 = (1{,}16 + 0{,}14 \times 1) \times 113{,}22 + 15 = 162{,}186 \text{ мм.}$$

длина витка:

$$Lw = 2 \times (162{,}186 + 67) = 458{,}372 \text{ мм.}/1000 \approx 0{,}4584 \text{ метров.}$$

Далее подсчет удобнее вести в метрах. Общая длина витков одной фазы, *метров*:

$$L\text{ф} = Lw \times w\text{ф} = 0{,}4584 \times 312 \approx 143{,}021 \text{ м.}$$

сопротивление одной фазы постоянному току:

$$R\text{ф}_{20} = \frac{\rho \times L\text{ф}}{Sw \times a^2} = \frac{0{,}0175 \times 143{,}021}{0{,}40715 \times 1^2} = \frac{2{,}50287}{0{,}40715} = 6{,}1473 \text{ Ом}$$

где ρ – удельное сопротивление металла проводника, медь 0,0175 (*Ом*×*мм*^{2}×*м.* при 20°С), Lф – длина всей одной фазы, *м.*, Sw – сечение витка, *мм*^{2}, (всех проводов в витке), a – количество параллельных ветвей в фазе (при их отсутствии a = 1).
Общая длина провода на электродвигатель, на три фазы соответственно:

$$L\text{пм} = Lw \times w\text{ф} \times m \times n = 0{,}4584 \times 312 \times 3 \times 1 = 429{,}0624 \text{ м.}$$

где Lw – длина одного витка, wф – витков в фазе, m – количество фаз, n – проводов в витке. Вес провода диаметром 0,72 *мм.* с изоляцией типа ПЭТ155 1 *гр./м.* ≈ 3,7 (или то же вес 1 *км.* в *кг.*) соответственно вес всего обмоточного провода на двигатель составит:

$$G\text{о} = G\text{из} \times L\text{пм} = 3{,}7 \times 429{,}0624 \text{ м.} = 1587{,}53 \text{ грамм или} \sim 1{,}588 \text{ кг.}$$

или

$$G\text{о} = 3{,}7 \times 0{,}4290624 \text{ км.} \approx 1{,}588 \text{ кг.}$$

где Gо – вес обмотки двигателя, Gиз – вес изолированного проводника (из справочной таблицы, *кг/км.*), Lпм – длина обмоточного провода всей обмотки (всех проводов).

Пример двигатель АИР132М2: Di = 127 *мм.*, L = 130 *мм.*, высота паза hz = 17,7 *мм.*, пазов статора Z = 36, витков в фазе wф = 174 (29 в пазе), шаг обмотки (укороченный) y = 15 (1 – 16), d провода 1,12 *мм.* × 2 проводника в витке, параллельных ветвей в фазе a = 2, полюсов 2p = 2. Зубцовое деление:

$$tz\text{к} = \frac{\pi \times (Di + hz)}{Z} = \frac{\pi \times (127 + 17{,}7)}{36} = 12{,}627 \text{ мм.}$$

ширина катушки (в лобовой части):

$$b\text{к} = tz\text{к} \times y = 12{,}627 \times 15 = 189{,}411 \text{ мм.}$$

длина лобовой части обмотки:

$$L\text{л} = (1{,}16 + 0{,}14 \times p) \times b\text{к} + 15 = (1{,}16 + 0{,}14 \times 1) \times 189{,}411 + 15 = 261{,}2354 \text{ мм.}$$

где p – пар полюсов (2p = 2/2 = 1).
Длина витка, *мм.* и *метров*:

$$Lw = 2 \times (L\text{л} + L) = 2 \times (261{,}2354 + 130) = 782{,}4708 \text{ мм.}/1000 \approx 0{,}783 \text{ м.}$$

где Lл – найденная длина лобовой части обмотки, L – длина статора.
Длина обмотки одной фазы (длина всех витков одной фазы, не провода!):

$$L\text{ф} = Lw \times w\text{ф} = 0{,}783 \times 174 \approx 136{,}3 \text{ м.}$$

сопротивление Rф фазы постоянному току:

$$R\text{ф}_{20} = \frac{\rho \times L\text{ф}}{Sw \times a^2} = \frac{0{,}0175 \times 136{,}3}{1{,}9704 \times 2^2} = \frac{2{,}38525}{7{,}8816} \approx 0{,}303 \text{ Ом}$$

где Rф – сопротивление фазы постоянному току, ρ – удельное сопротивление меди (0,0175 *Ом×мм²×м.* при 20°С), Sw – сечение витка (всех проводов в витке, сечение d1,12 = 0,9852 × 2 проводника в витке = 1,9704 *мм²*), a – параллельных ветвей в фазе.

$$L\text{пм} = Lw \times w\text{ф} \times m \times n = 0{,}783 \times 174 \times 3 \times 2 \approx 817{,}45 \text{ метров}$$

Lw – длина одного витка, wф – витков в фазе, m – количество фаз (три), n – проводников в витке. Вес провода 1,12 *мм.* с изоляцией (ПЭТ155) = 9,0116 *кг/км.*

$$G\text{о} = G\text{из} \times L\text{пм} = 9{,}0116 \times 817{,}45 = 7366{,}53 \text{ грамм}/1000 \approx 0{,}737 \text{ кг.}$$

где: Gо – вес всей обмотки, Gиз – вес проводника с изоляцией (по справке), Lпм – длина провода на весь мотор, длина всех проводов.

Дополнение.

При отсутствии данных веса изолированного провода подсчет веса обмотки возможно рассчитать так же по следующим формулам.
Вес *меди* обмотки электродвигателя, *кг.*:

$$G\text{м} = \frac{8{,}93 \times w\text{ф} \times Sw \times Lw \times m}{1000}$$

где 8,93 – удельный вес меди, *г/см²*, wф – витков в фазе, Sw – сечение витка, *мм²* (всех проводников в витке), Lw – длина витка, *м.*, m – количество фаз (3).

Пример. Витков в фазе wф = 174 (29 в пазе), d провода 1,12 *мм*. × 2, сечение 1,12 = 0,9852 × 2 проводника в витке = сечение витка 1,9704 *мм*^{2}, длина витка Lw = 0,783 *м*. (данные из предыдущего примера):

$$G\text{м} = \frac{8{,}93 \times w\text{ф} \times Sw \times L\text{в} \times m}{1000} = \frac{8{,}93 \times 174 \times 1{,}9704 \times 0{,}783 \times 3}{1000} = 7{,}1918 \text{ кг.} \approx 7{,}2 \text{ кг}$$

Gм – вес *голой* меди обмотки на весь мотор без учета изоляции проводников. Для достаточной практической точности вес проводников с изоляцией составит увеличением на 4% найденного веса голой меди:

$$G\text{миз} = G\text{м} \times 1{,}04 = 7{,}2 \times 1{,}04 \approx 7{,}48 \text{ кг.}$$

Gмиз – вес изолированного провода на весь мотор.
Другая формула подсчета веса, предпочтительная для круглых обмоточных проводов:

$$G\text{миз} = \left[0{,}876 + 0{,}124 \times \left(\frac{d\text{из}}{d}\right)^2\right] \times G\text{м}$$

где dиз – диаметр провода с изоляцией, d – диаметр голого провода, Gм – найденный вес голой меди.
Пример. Диаметр провода d = 1,12 *мм*. dиз = 1,217 *мм*.

$$G\text{миз} = \left[0{,}876 + 0{,}124 \times \left(\frac{d\text{из}}{d\text{г}}\right)^2\right] \times G\text{м} = \left[0{,}876 + 0{,}124 \times \left(\frac{1{,}217}{1{,}12}\right)^2\right] \times 7{,}2 = 7{,}3613 \text{ кг.}$$

Выше рассчитанные веса составляют вес обмотки без учета на технологический расход провода при ремонте, который может составить дополнительно 2 – 5%, то есть полученный вес следует умножить на 1,02 – 1,05.

Подсчет сопротивления так же возможен по альтернативной формуле:

$$R\text{ф}_{20} = \frac{L\text{ф}}{57 \times Sw \times a^2}$$

где Rф – сопротивление фазы, *Ом*, Lф – длина фазы обмотки, *м*., 57 – делитель соответствующий удельному сопротивлению меди *Ом*×*мм*^{2}/*м.*, (1/0,0175 ≈ 57 при 20°С), Sw – сечение витка обмотки (сечение всех проводников в витке), *мм*^{2}., a – количество параллельных ветвей в фазе. Пример:

сопротивление фазы, параллельных ветвей в фазе нет:

$$R\text{ф}_{20} = \frac{L\text{ф}}{57 \times Sw \times a^2} = \frac{136{,}3}{57 \times 1{,}9704 \times 1^2} = \frac{136{,}3}{112{,}31286} = 1{,}2135 \text{ Ом}$$

при двух параллельных ветвях в фазе:

$$R\text{ф}_{20} = \frac{L\text{ф}}{57 \times Sw \times a^2} = \frac{136{,}3}{57 \times 1{,}9704 \times 2^2} = \frac{136{,}3}{449{,}2512} = 0{,}303 \text{ Ом}$$

Сопротивление фазы при работе двигателя будет несколько иным.
Активное сопротивление фазы статорной обмотки с учетом температуры нагрева обмотки и коэффициента вытеснения при переменном токе kf = 1,05:

$$R\phi t = \frac{kf \times \rho \times (1 + \alpha \times \Delta t) \times Lw \times w\phi}{Sw \times a^2}$$

где $w\phi$ – количество витков фазы, Lw – длина витка фазы, *м.*, Sw – сечение витка (*мм*^{2}), удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления меди (ρ = 0,0175 *Ом×м×мм*^{2}, при 20°С, α = 0,004 на 1 градус С°). Так, для рабочей температуры обмотки 75°С (Δt = 75°С – 20°С = 55°С) и значении коэффициента вытеснения тока для 50 *гц* kf = 1,05, для предидущего примера:

$$R\phi_{75} = \frac{1{,}05 \times 0{,}0175 \times (1 + 0{,}004 \times 55) \times 0{,}783 \times 174}{1{,}9704 \times 2^2} = 0{,}3875 \text{ Ом}$$

Коэффициент kf учитывает вытеснение тока при переменном напряжении к поверхности проводника, так называемый "скин-эффект", при котором фактически увеличивается сопротивление проводника.

Подсчет вылета лобовой части обмотки, расстояние от статора занимаемое обмоткой при высоте h оси вращения двигателя:

h до 132 *мм.*:

$$L\text{влоб} = (0{,}19 + 0{,}1 \times p) \times b\text{к} + 10$$

h более 160 *мм.*:

$$L\text{влоб} = (0{,}12 + 0{,}15 \times p) \times b\text{к} + 10$$

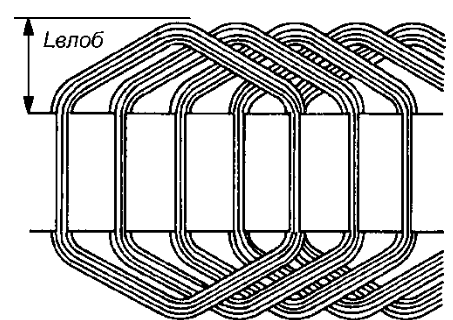


Рис. 18. К определению вылета лобовой части обмотки.

например для h до 132 *мм.*, (пар полюсов p и ширина катушки bк из примера выше):

$$L\text{влоб} = (0{,}19 + 0{,}1 \times p) \times b\text{к} + 10 = (0{,}19 + 0{,}1 \times 1) \times 110 + 10 = 41{,}89 \approx 42 \text{ мм.}$$

18. Количество пазов статоров и роторов асинхронных двигателей.

Числа зубцов статора Z_1 и ротора Z_2 не должны быть равны, ни кратны друг другу, иначе будет опасность прилипания, застревания ротора, особенно при пуске. Не верное соотношение пазов статора/ротора также приводит к заметному повышению шума, вибрации двигателя при работе.

$$Z_2 \neq Z_1 \quad Z_2 \neq 0{,}5 \times Z_1 \quad Z_2 \neq 2 \times Z_1$$

Число зубцов ротора не должно делиться на утроенное число полюсов, иначе также возможно прилипание.

$$\frac{Z_2}{3 \times 2p} \neq \text{ целое число}$$

Число зубцов ротора, увеличенное или уменьшенное на единицу, не должно делиться на утроенное число полюсов.

$$\frac{Z_2 \pm 1}{3 \times 2p} \neq \text{целое число}$$

Число зубцов ротора, разделенное на число полюсов, не должно давать чисел 4, 7 и 10, иначе возможно застревание.

$$\frac{Z_2}{2p} \neq 4 \quad \frac{Z_2}{2p} \neq 7 \quad \frac{Z_2}{2p} \neq 10$$

Числа зубцов статора и ротора не должны отличаться друг от друга на число пар полюсов или на число полюсов.

$$Z_2 \neq Z_1 \pm p \qquad Z_2 \neq Z_1 \pm 2p$$

Таблица 10. Соотношения пазов статора и пазов ротора.

$2p$	Z_1	число пазов ротора Z_2	
		без скоса пазов	со скосом пазов
2	12	9*, 15*	–
	18	11*, 12*, 15*, 21*, 22	14*, (18), 19*, 22*, 26, 28*, (30), 31, 33, 34, 35
	24	15*, (16)*, 17*, 19, 32	18, 20, 26, 31, 33, 34, 35
	30	22, 38	(18), 20, 21, 23, 24, 37, 39, 40
	36	26, 28, 44, 46	25, 27, 29, 43, 45, 47
	42	32, 33, 34, 50, 52	–
	48		37, 39, 41, 55, 57, 59
4	12	9*	15*
	18	10*, 14*	18*, 22*
	24	15*, 16*, 17, (32)	16, 18, (20), 30, 33, 34, 35,36
	36	26, 44, 46	(24), 27, 28, 30, (32), 34, 45, 48
	42	(34), (50), 52, 54	(33), 34, (38), (51), 53
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	(36), (38), (39), 40, (44), 57, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71
	72	62, 64, 80, 82, 86	61, 63, 68, 76, 81, 83
6	36	26, 46, (48)	28*, 33, 47, 49, 50
	54	44, 50, 64, 66, 68	42, 43, 51, 65, 67
	72	56, 58, 62, 82, 84, 86, 88	57, 59, 60, 61, 83, 85, 87, 90
	90	74, 76, 78, 80 100, 102, 104	75, 77, 79, 101, 103, 105
8	48	(34), 36, 44, 62, 64	35, 44, 61, 63, 65
	72	56, 58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	84	66, (68), 70, 98, 100,102, 104	(68), (69), (71), (97), (99), (101)
	96	78, 82, 110, 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113
10	60	44, 46, 74, 76	57, 69, 77, 78, 79
	90	68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110, 112, 114	70,71,73, 87, 93, 107, 109
	120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106, 134, 136, 138, 140, 142, 146	99, 101, 103, 117, 123,137, 139
12	72	56, 64, 80, 88	69, 75, 80, 89, 91, 92
	90	68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110	(71), (73), 86, 87, 93, 94, (107), (109)
	108	86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130, 132	84, 89, 91, 104, 105, 111, 112, 125, 127
	144	124, 128, 136, 152, 160, 164, 166, 168, 170, 172	125, 127, 141, 147, 161, 163
14	84	74, 94, 102, 104, 106	75, 77, 79, 89, 91, 93, 103
	126	106, 108, 116, 136, 144, 146, 148, 150, 152, 154, 158	107, 117, 119, 121, 131, 133, 135, 145
16	96	84, 86, 106, 108, 116, 118,	90, 102
	144	120, 122, 124, 132, 134, 154, 156, 164, 166, 168, 170, 172	138, 150

Число зубцов ротора не должно отличаться от половины числа зубцов статора на число пар полюсов.

$$Z_2 \neq 0{,}5 \times Z_1 \pm p$$

Число зубцов ротора не должно отличаться от удвоенного числа зубцов статора на число полюсов.

$$Z_2 \neq 2 \times Z_1 \pm 2p$$

Число зубцов ротора, увеличенное или уменьшенное на число полюсов, увеличенное или уменьшенное на единицу, не должно делиться на утроенное число полюсов, так как возможно гудение.

$$\frac{Z_2 \pm 2p \pm 1}{3 \times 2p} \neq \text{целое число}$$

В таблице 11 приведены соотношения пазов статора и ротора для правильной работы электродвигателя.

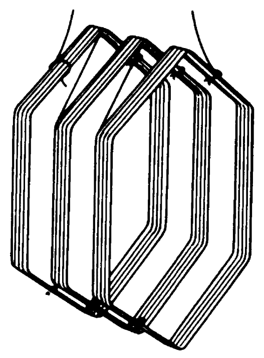
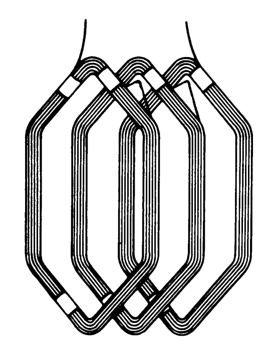



Рис. 19. Катушечная группа из трех катушек, q = 3.

19. Построение обмотки.

Катушка – часть обмотки, принятая в индукционных электродвигателях, асинхронных, синхронных, состоит из нескольких витков, проводников укладываемых в паз стального сердечника. Катушечная группа – несколько катушек, соединенных последовательно образующих полюсную группу. "Секция" в русскоязычной терминологии относится к якорным обмоткам, и употребляется применительно к обмоткам двигателей постоянного тока, соответствует термину "катушка".

Число последовательно соединенных витков в обмотке фазы вычисляется по формуле (для трех фаз):

$$w\text{ф} = \frac{w\text{п} \times Z}{6}$$

Витков в пазе от количества витков фазы:

$$w\text{п} = \frac{w\text{ф} \times 6}{Z}$$

где wп – витков в пазе, wф – витков фазы, q – пазов на полюс и фазу, p – пар полюсов электродвигателя. Z – количество пазов статора.

Шаг обмотки (полный, диаметральный) и это же полюсное деление в пазах:

$$y = \frac{Z}{2p}$$

Пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m}$$

Z – количество пазов статора, m – количество фаз (три), $2p$ – количество полюсов. Катушечная группа состоит из катушек. Число катушек в группе равно числу q.

Число катушечных групп Kгр в обмотке одной фазы:

при однослойной обмотке: $K\text{гр} = p$ при двухслойной обмотке: $K\text{гр} = 2p$

где p – количество пар полюсов, $2p$ – количество полюсов.

Общее число катушечных групп трехфазного двигателя на весь двигатель соответственно одно– или двухслойной обмотки:

$$Кгрод = p \times m \quad Кгрдв = 2p \times m \qquad \text{где: } m - \text{количество фаз.}$$

Укладка катушечных групп в статоре происходит согласно определенным правилам. Для удобства подсчета полюс в двигателе не зависимо от количества полюсов принимается и занимает 180 электрических градусов по окружности статора, не следует путать с геометрическими градусами. В однослойной обмотке, например четырехполюсного электродвигателя, первая катушечная группа участвует в создании первой пары полюсов, вторая – создает вторую пару полюсов, следовательно, расстояние между ними должно быть равно одной паре полюсов, т. е. 360 электрических градусов (180×2). Отсюда сдвиг $\Delta од$ между катушечными группами одной фазы в пазах, например для 54 пазов и 6 полюсов:

$$\Delta\text{од} \to \frac{360^\circ}{\alpha} \quad \text{где: } \alpha = \frac{180^\circ \times 2p}{Z} \qquad \text{например } \alpha = \frac{180^\circ \times 6}{54} = 20 \text{ эл. гр.}$$

где α – число электрических градусов на один паз статора.
Тогда сдвиг следующей катушечной группы ***однослойной*** обмотки:

$$\Delta\text{од} \to \frac{360^\circ}{\alpha} = \frac{360^\circ}{20^\circ} = 18 \text{ паз, или сразу в пазах: сдвиг } \Delta\text{од} \to \frac{Z}{p} = \frac{54}{3} = 18 \text{ пазов}$$

то есть следующая катушечная группа однослойной обмотки начинается в пазе 18 + 1 = 19, следующая катушечная группа 19 + 18 = 37 паз. Пример показан на рисунке 20.

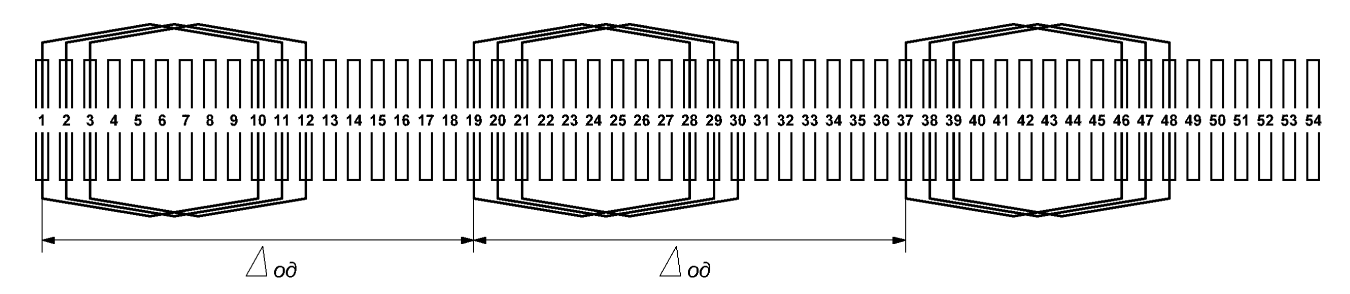


Рис. 20. Пример однослойной обмотки с полным шагом Z = 54, $2p$ = 6,
показан сдвиг катушечных групп.

Сдвиг следующей катушечной группы при ***двухслойной*** обмотке соответствует 180 эл. градусам. Отсюда сдвиг $\Delta дв$ между катушечными группами одной фазы в пазах будет:

$$\Delta\text{дв} \to \frac{180^\circ}{\alpha} \quad \text{где} \quad \alpha = \frac{180^\circ \times 2p}{Z} \quad \text{например} \quad \frac{180^\circ \times 6}{54} = 20 \text{ эл. гр.}$$

$$\Delta\text{дв} \to \frac{180^\circ}{\alpha} = \frac{180^\circ}{20^\circ} = 9 \text{ пазов, или сразу в пазах: сдвиг } \Delta\text{дв} \to \frac{Z}{2p} = \frac{54}{6} = 9 \text{ пазов}$$

то есть следующая катушечная группа ***двухслойной*** обмотки начинается в пазе 9 + 1 = 10, следующая 10 + 9 = 19, следующая 19 + 9 = 28 паз и т. д. Пример показан на рисунке 21.

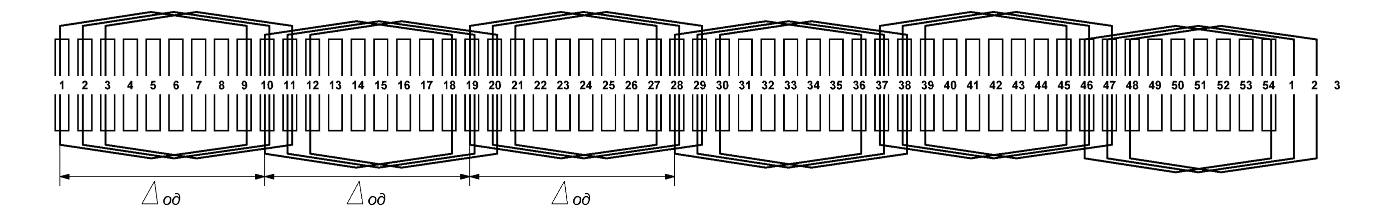


Рис. 21. Пример двухслойной обмотки Z = 54, 2p = 6,
укладка катушечных групп, показана одна фаза,

Двухслойная обмотка выполнима при любом принятом шаге y по пазам. Однослойная обмотка ограничена выбором шагов для ее выполнения, выполнима при полном шаге, выполняется в "развалку" и/или с разношаговыми катушками. Сдвиг катушечных групп по пазам не зависит от принятого шага по пазам.

Начало второй фазы должно быть сдвинуто от начала первой **фазы** (если q целое число) на 120 эл. град или на 2/3 полюсного деления. Полюсное деление τz выраженное в количестве пазов (то же полный шаг):

$$\tau z = \frac{Z}{2p} \qquad \text{для примера на картинке} \quad \tau z = \frac{54}{6} = 9$$

то начало второй фазы должно быть сдвинуто на:

$$\Delta\text{ф} \rightarrow \frac{2}{3} \times \tau z, \text{например при полюсном делении 12 пазов: } \frac{2}{3} \times 9 = 6 + 1 \text{ паз}$$

Или сразу в пазах шаг смещения фазы:

$$\Delta\text{ф} \rightarrow \frac{Z}{p \times m} \qquad \text{для примера } \Delta\text{ф} \rightarrow \frac{54}{3 \times 3} = 6 + 1$$

где p – пар полюсов, то есть начало следующей, второй фазы, должно располагаться в 6 + 1 = 7 пазе. Следующее начало третьей фазы соответственно должно быть сдвинуто от начала второй так же на 6 пазов, то есть 7 + 6 = 13 паз.

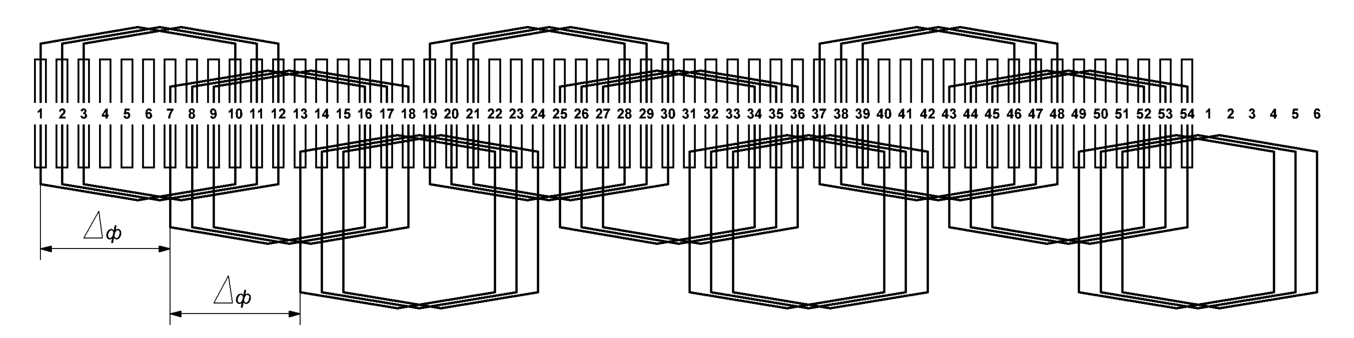


Рис. 22. Однослойная обмотка с полным (диаметральным) шагом
y = 9 (1 – 10), Z = 54, 2p = 6.

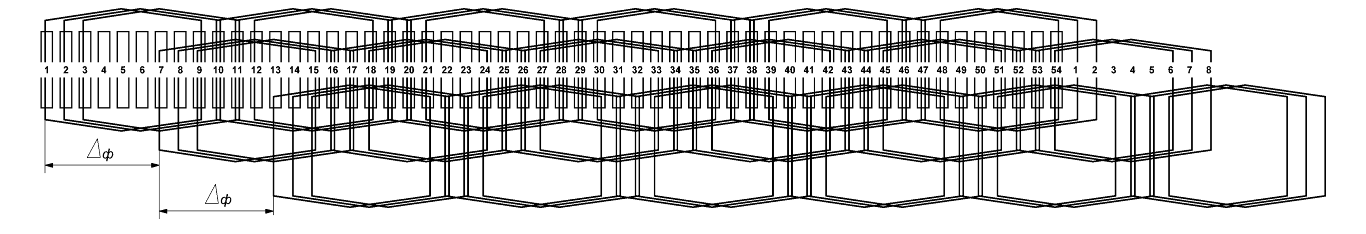


Рис. 23. Двухслойная обмотка с укороченным шагом y = 8 (1 – 9), Z = 54, 2p = 6.

Другой вариант подсчета сдвига фаз по статору используя электрические градусы.

$$\Delta\phi B \rightarrow \frac{120^o}{\alpha} \quad \Delta\phi C \rightarrow \frac{240^o}{\alpha} \quad \text{пример: } \Delta\phi B \rightarrow \frac{120^o}{20^o} = 6 + 1 = 7, \ \ \Delta\phi C \rightarrow \frac{240^o}{20^o} = 12 + 1 = 13$$

Здесь сдвиг фаз B и C, A – находится в первом пазе. Соответственно 7 паз и 13 паз, где α – число электрических градусов на один паз.

Сдвиг фаз на 2/3 *полюсного* деления является обязательным правилом для трехфазного промышленного напряжения, для всех типов обмоток не зависимо от их конструкций, цепных, в развалку, концентрических, двухслойный, однослойных с целым числом q на полюс и фазу и не зависит от принятого шага y по пазам. Сдвиг обмоток каждой фазы в статоре по отношению к другой соответствует сдвигу фаз напряжения.



Образование полюсов в обмотке и соединение катушечных групп.

В отличии от электродвигателей постоянного тока, в электродвигателях с распределенной обмоткой полюс образуется в том месте, где проводники пересекают стальной сердечник, см. рис. 24, то есть полюс образуется в пазах в которых уложены стороны катушек обмотки. Проводники в лобовой части не участвуют в образовании полюсов, а только переносят *эдс*.

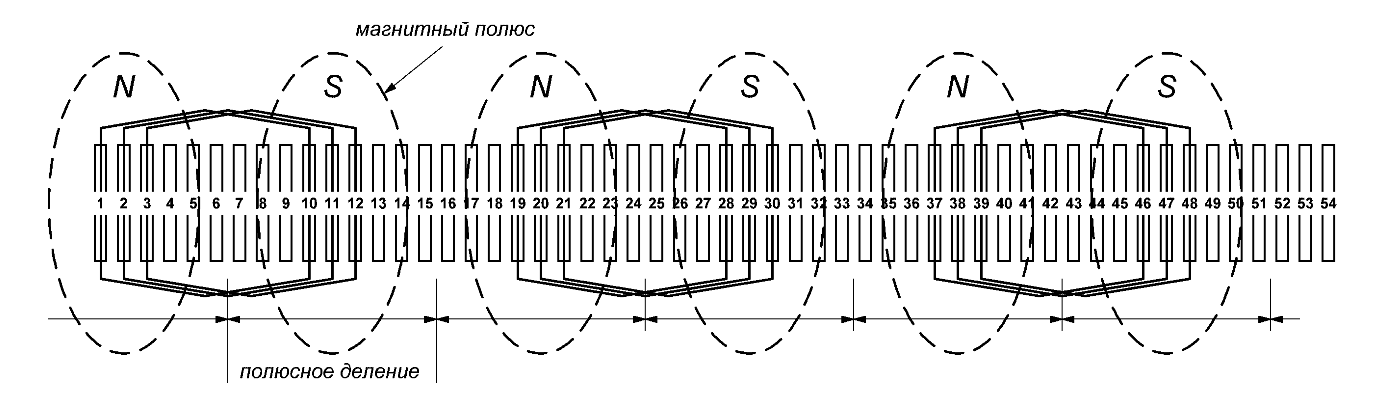


Рис. 24. Образование полюсов распределенной обмотки.

В соответствии чередования полярности полюсов соединяются катушки обмотки, протекание тока через обмотку показано стрелками на рисунке 25. Направление течения тока в пазах меняется в соответствии чередования и изменения полярности.

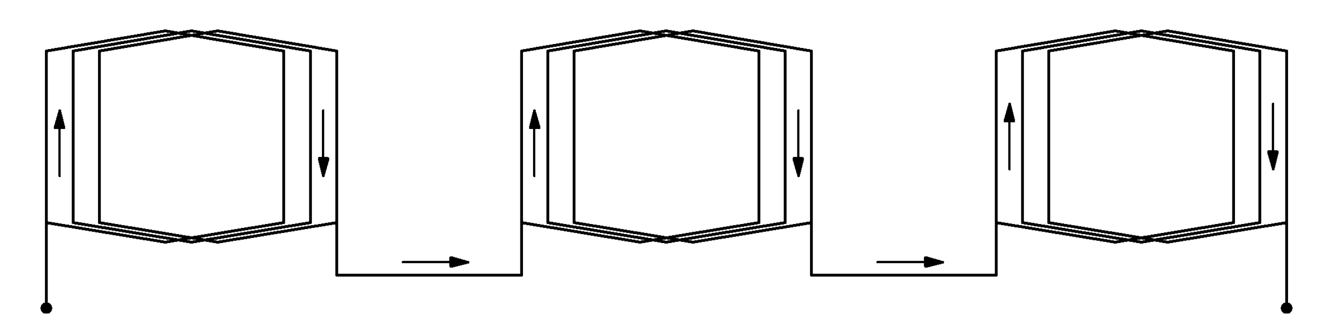


Рис. 25. Соединение катушечных групп при образовании чередования полюсов.

В двухслойной обмотке направление течения тока в рядом лежащих сторонах катушек должно совпадать На рисунке 26 двухслойная обмотка, катушечные группы для наглядности раздвинуты. При чередовании полюсов, изменении их полярности, изменяется течение тока в сторонах катушках лежащих в пазах образующих полюс.

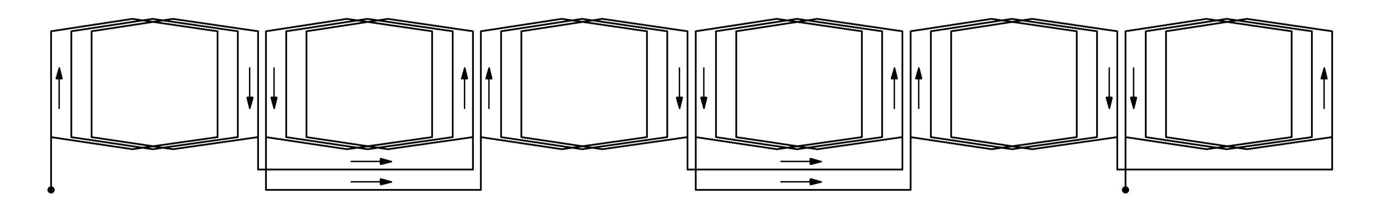


Рис. 26. Двухслойная обмотка, Z = 54, 2p = 6, y = 1 – 9.
Показано соединение катушек в фазе, течение тока.

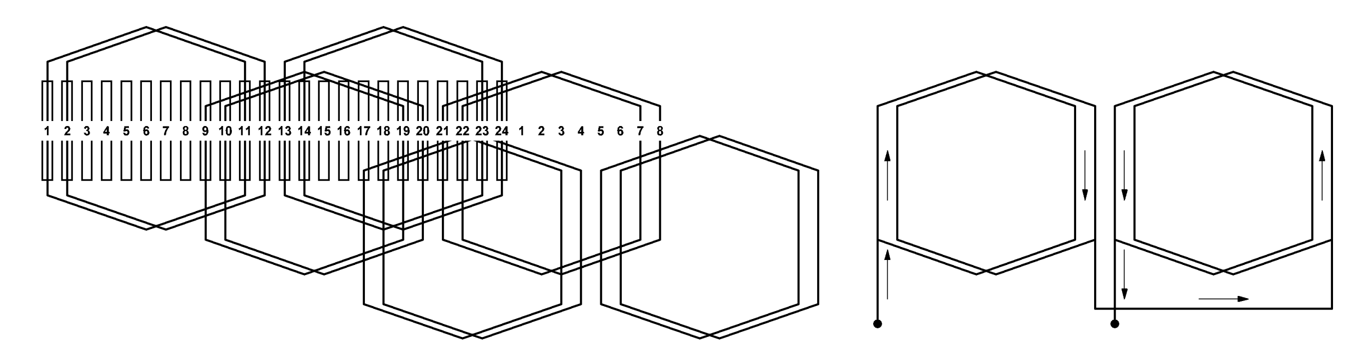


Рис. 27. Однослойная обмотка "в развалку" Z = 24, 2p = 2, y = 1 – 11.
Показана укладка обмотки, соединение катушек в фазе,
стрелками показано течение тока.

Понимание правил соединений катушек образующих полюс исключает запись обмотчиками соединений в обмоточных записках "конец–начало", "конец–конец" и т. п.

20. О параллельных проводниках в витке.

Пример. Сопротивление фазы трехфазного электродвигателя постоянному току, согласно расчету 1,2053 *Ом*. Казалось бы, согласно закону Ома, в таком случает ток (фазный) электродвигателя должен быть:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{1{,}2053} = 182{,}53\ A$$

Что невероятно, по паспорту машины ток 10 *А*. Дело в том, что проводники обмотки расположенные в массиве стального сердечника имеют значительное индуктивное сопротивление при переменном токе. Различают активное и реактивное сопротивление. Активное сопротивление – сопротивление постоянному току, реактивное сопротивление – это индуктивное сопротивление, емкостное сопротивление. Емкость между фазами в обмотке электродвигателя присутствует (как в конденсаторе), но она очень незначительна и величиной пренебрегают. При наличии реактивного сопротивления общее сопротивление называют импедансом схемы, принято обозначать буквой Z. Находится по обычным правилам, обозначается так же в *Ом*.

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{220}{10} = 22\ \text{Ом}, \quad I = \frac{220}{22} = 10\ A$$

Таким образом полное сопротивление фазы 22 *Ом*, при активном сопротивлении 1,2053 *Ом*. Импеданс состоит из сумм индуктивного и активного сопротивления:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

отсюда, реактивное сопротивление X_L составит:

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{22^2 - 1{,}2053^2} = \sqrt{484 - 1{,}45274809} \approx 21{,}96 \text{ Ом}$$

индуктивное сопротивление зависит от величины индуктивности L:

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times L$$

где π – число "пи", f – частота тока (50 *гц*.), L – индуктивность в Генри (H).
Отсюда индуктивность фазы:

$$L = \frac{X_L}{2 \times \pi \times f} = \frac{21{,}96}{2 \times 3{,}14159 \times 50} = \frac{21{,}96}{314{,}159} = 0{,}0699\, H$$

В различных справочниках, учебниках обмотчиков, приводятся справочные таблицы замены проводов при отсутствии необходимого диаметра. Предлагаются замены одного проводника двумя или тремя меньшими диаметрами, с размерами номиналов далеко отстоящими друг от друга. Например, 1,12 *мм*. заменить предлагается 0,9 + 0,67 *мм*. Обмотчики пересчитывая отсутствующий провод применяют еще более отстоящие друг от друга диаметры проводников. Так делать крайне не желательно.
Ток в параллельных проводниках в витке из за индуктивности, ее влияния на сопротивление, распределится не равномерно. Плотность тока в проводнике меньшего диаметра будет значительно больше, чем в проводнике большего диаметра.
Пример. Ток двигателя (фазный) 10 ампер, при 220 вольт, активное, полное сопротивление, индуктивность фазы как приведено выше в примере, длина витка 0,78 *м*., витков фазы 174, фаза имеет не имеет параллельные ветвей, виток выполнен в два проводника 1,12 *мм*. сечение 0,9852 *мм*^{2} × 2 = 1,9704 *мм*^{2}, общая дина фазы Lф = 0,78 × 174 = 135,72 *м*. Активное сопротивление одной проволоки 1,12 *мм*.:

$$R = \frac{\rho \times L\text{ф}}{S\text{п}} = \frac{0{,}0175 \times 135{,}72}{0{,}9852} = \frac{2{,}3751}{0{,}9852} = 2{,}4107 \text{ Ом}$$

двух, сопротивление фазы:

$$R\text{ф}_{20} = \frac{\rho \times L\text{ф}}{Sw} = \frac{0{,}0175 \times 135{,}72}{1{,}9704} = \frac{2{,}3751}{1{,}9704} = 1{,}2053 \text{ Ом}$$

Виток состоит из двух одинаковых проводников, с одинаковым сечением 0,9852 *мм*^{2}, и ток в параллельных проводниках витка распределится так же согласно сопротивлению каждого проводника, так как проводники имеют одинаковое сечение, то и сопротивление их одинаково, в каждом проводнике потечет половина тока:

$$\frac{10}{2} = 5\, A$$

и плотность тока в каждом проводнике витка:

$$\frac{5}{0{,}9852} = 5{,}08\, A/\text{мм}^2$$

здесь 0,9852 *мм*^{2} – сечение одного параллельного проводника в витке, проволоки.
Распределение плотности тока, мощности выделяемой в виде тепла на обмотке изменится при не равных диаметрах (сечениях) проводников в витке.

Предположим замену одного из параллельных проводников, в данном примере 1,12 *мм*. на два 0,9 + 0,67 *мм*. по рекомендации одного из справочников. Виток будет состоять из проводов 1,12 + 0,9 + 0,67 *мм*. Подсчитаем активные сопротивления каждого, 1,12 подсчитан ранее 2,4107 *Ом*. Два других:

0,9 *мм*. сечение 0,63617 *мм*²

$$R = \frac{\rho \times L\text{ф}}{S\text{п}} = \frac{0{,}0175 \times 135{,}72}{0{,}63617} = \frac{2{,}3751}{0{,}63617} = 3{,}7334 \text{ Ом}$$

0,67 *мм*. сечение 0,35257 *мм*²

$$R = \frac{\rho \times L\text{ф}}{S\text{п}} = \frac{0{,}0175 \times 135{,}72}{0{,}35257} = \frac{2{,}3751}{0{,}35257} = 6{,}7365 \text{ Ом}$$

Однако с учетом индуктивности фазы 0,0699 *H* реактивные сопротивления трех проводников в витке:

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times L = 2 \times 3{,}14159 \times 50 \times 0{,}0699 \approx 21{,}96 \text{ Ом}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{2{,}4107^2 + 21{,}96^2} = 22{,}092 \text{ Ом}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{3{,}7334^2 + 21{,}96^2} = 22{,}275 \text{ Ом}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{6{,}7365^2 + 21{,}96^2} = 22{,}97 \text{ Ом}$$

Как видно из расчета, не смотря на различие активных сопротивлений параллельных проводников в витке, их реактивные сопротивления практически равны. По витку из трех проводников будет протекать ток 10 *А*, и при этом согласно их полным реактивным сопротивлениям ток разделится на три тока в трех параллельных проводниках:

$$\text{для 1,12 мм. } \frac{22{,}092}{67{,}337} \times 10 = 3{,}28\ A, \quad \text{для 0,9 мм. } \frac{22{,}275}{67{,}337} \times 10 = 3{,}308\ A$$

$$\text{для 0,67 мм. } \frac{22{,}97}{67{,}337} \times 10 = 3{,}411\ A$$

где 22,092 + 22,275 + 22,97 = 67,337 сумма полных сопротивлений.
Плотность тока в каждом их трех проводников составит:

$$\text{для 1,12 мм. } \frac{3{,}28}{0{,}9852} = 3{,}33\ A/\text{мм}^2, \qquad \text{для 0,9 мм. } \frac{3{,}308}{0{,}63617} = 5{,}2\ A/\text{мм}^2$$

$$\text{для 0,67 мм. } \frac{3{,}411}{0{,}35257} = 9{,}67\ A/\text{мм}^2$$

В знаменателях сечения проводников, *мм*². В наихудшем положении окажется проводник с наименьшим диаметром с большой плотностью тока.

Выделяемая мощность в виде тепла, потеря на активном сопротивлении в фазе составит:

$$P = I^2 \times R = 10^2 \times 1{,}2053 = 120{,}334 \text{ ватт}$$

согласно плотностям тока распределение потерь в параллельных проводниках витка:

$$\text{для 1,12 мм. } \frac{3{,}33}{18{,}2} \times 120{,}334 = 22{,}017 \text{ ватт}, \quad \text{для 0,9 мм. } \frac{5{,}2}{18{,}2} \times 120{,}334 = 34{,}38 \text{ ватт}$$

$$\text{для 0,67 мм. } \frac{9{,}67}{18{,}2} \times 120{,}334 = 63{,}93 \text{ ватт}$$

где 3,33 + 5,2 + 9,67 = 18,2 сумма плотности тока в трех проводниках.
Что показывает – наибольшая тепловая мощность выделится на проводнике с наименьшим диаметром. Справедливо заметить, что проводники в обмотке тесно соприкасаются вместе в пазе, в лобовой увязанной части, склеены пропиточным лаком и таким образом передают тепло друг другу и нагреваются равномерно. Но как показано в этом примере не желательно составлять виток из проводников разного диаметра, по возможности пересчитывать все сечение витка таким образом, что бы проводники были одинаковы или по возможности близки по диаметрам.

21. Примеры расчета.

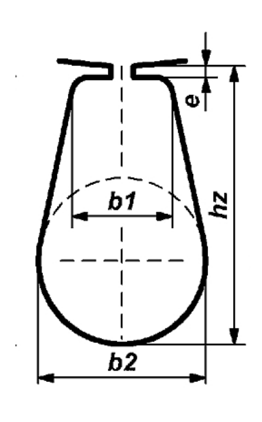


Рис. 28.
Форма паза
к примеру расчета.

Пример. В ремонт поступил электродвигатель без паспорта и без обмотки, вероятно 5А280М2. Двигатель закрытый IP44, охлаждение обдувом вентилятором на валу. По внешнему виду предположительно 90 *квт*., $2p$ = 2, Da = 410 *мм*, Di = 225 *мм*., L = 310 *мм*., Z = 36. Паз на рисунке 28, размеры паза: $b1$ = 10, $b2$ = 14, hz = 32, e = 2 *мм*. Поиском по обмоточным данным выяснено, что внутренний диаметр 255 *мм*. при внешнем 400 *мм*. имеется в сериях двигателей производства КНР. Учитывая возможную ошибку при снятии размеров, и предполагая происхождение двигателя принимаем внешний диаметр 400 *мм*. Высоту ярма измерить не удалось, ширина зубца не измерена. Напряжение 380/660.

Высоту ярма определим расчетом.

$$hc = \frac{Da - (Di + hz \times 2)}{2} = \frac{400 - (225 + 32 \times 2)}{2} = 55{,}5 \text{ мм.}$$

Вычисление ширины зубца по размеру $b1$:

$$bz1 = \left(\frac{\pi \times (Di + e \times 2)}{Z}\right) - b1 = \left(\frac{3{,}14159 \times (225 + 2 \times 2)}{36}\right) - 10 = 9{,}98 \text{ мм.}$$

по размеру $b2$:

$$bz2 = \left(\frac{(Di + hz \times 2 - b2) \times \pi}{Z}\right) - b2 = \left(\frac{(225 + 32 \times 2 - 14) \times 3{,}14159}{Z}\right) - 14 = 9{,}99 \text{ мм.}$$

равные значения показывают, что паз измерен точно, примем bz = 10 *мм.*

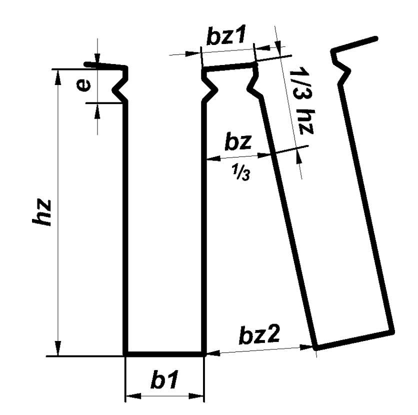


Рис. 29. Разная ширина зубца по высоте.

Если стороны зубца статора не параллельны друг другу, см. рис 29, то зубец имеет разные размеры ширины в верхней и в нижней части, то расчетный замер его ширины, применяемой в расчете, производится на высоте ⅓ от расточки статора. Расчетным путем можно определить этот размер по формуле:

$$bz⅓ = \frac{2 \times bz1 + bz2}{3}$$

где $bz1$ узкая и $bz2$ широкая часть зубца. Справедливо для любой формы паза.

Приближенное определение полюсов статора, возможность использования на два полюса:

$$2p = \frac{0{,}5 \times Di}{hc} = \frac{0{,}5 \times 225}{55{,}5} = 2{,}02 \text{ и } 2p = \frac{0{,}35 \times Z \times bz}{hc} = \frac{0{,}35 \times 36 \times 10}{55{,}5} = 2{,}27$$

полученное округляют до ближайшего целого, до 2. Справочные данные так же сообщают, что этот размер используется в двухполюсных электродвигателях. Выбираем двухслойную обмотку шагом 15 (1 – 16), q = 6, в две параллельные ветви, a = 2. Коэффициент обмотки:

$$k\text{об} = \frac{0{,}5}{q \times sin\frac{30°}{q}} \times sin\left(\frac{y\text{к}}{y} \times 90°\right) = \frac{0{,}5}{6 \times sin\frac{30°}{6}} \times sin\left(\frac{15}{18} \times 90°\right) = 0{,}9236$$

Согласно справочным данным принимаем предварительно индукцию в воздушном зазоре 0,75 *Тл.*, и коэффициент падения напряжения ke = 0,985. Витков в фазе:

$$w\text{ф}' = \frac{ke \times U\text{ф} \times p \times 10^6 \times a}{4{,}443 \times f \times k\text{об} \times Di \times L \times B\delta} = \frac{0{,}985 \times 380 \times 1 \times 10^6 \times 2}{4{,}443 \times 50 \times 0{,}9236 \times 225 \times 310 \times 0{,}75} = 69{,}745$$

Витков в пазе:

$$w\text{п}' = \frac{w\text{ф} \times 6}{Z} = \frac{69{,}745 \times 6}{36} = 11{,}62$$

Принимаем 12 витков в пазе, 12/2 = 6 в катушке (двухслойная обмотка), соответственно в фазе 72 витка (wф = wп × Z/6). Уточнение индукции в воздушном зазоре при 72 витках в фазе:

$$B\delta = \frac{0{,}985 \times 380 \times 1 \times 10^6 \times 2}{4{,}443 \times 50 \times 0{,}9236 \times 225 \times 310 \times 72} = 0{,}726$$

индукция в ярме:

$$B\text{с} = \frac{0{,}985 \times 380 \times 10^6 \times 2}{4{,}443 \times 50 \times 0{,}9236 \times 2 \times 0{,}95 \times 310 \times 55{,}5 \times 72} = 1{,}55$$

индукция в зубцах:

$$Bz = \frac{0{,}985 \times 380 \times 1 \times 3{,}14159 \times 10^6 \times 2}{4{,}443 \times 50 \times 0{,}9236 \times 36 \times 10 \times 310 \times 0{,}95 \times 72} = 1{,}501$$

Что соответствует нормальным индукциям.

Заполнение паза и выбор провода для этого примера дан в параграфе 12. Виток состоит из провода диаметром 1,5 *мм*. в 7 параллельных проводников.
Кпд и косинус фи в расчете задаются. Для мощности 90 *квт*. принимаем *кпд* = 0,91, *cos*φ = 0,9. Токи двигателя при работе, при соединении в треугольник:

$$I_{\triangle} = \frac{P\text{квт} \times 1000}{\sqrt{3} \times U_{\triangle} \times \eta \times cos\varphi} = \frac{90 \times 1000}{1{,}732 \times 380 \times 0{,}91 \times 0{,}9} = \frac{90000}{539{,}033} = 166{,}96\ A$$

при соединении в звезду:

$$I_{Y} = \frac{P\text{квт} \times 1000}{\sqrt{3} \times U_{Y} \times \eta \times cos\varphi} = \frac{90 \times 1000}{1{,}732 \times 660 \times 0{,}91 \times 0{,}9} = \frac{90000}{936{,}215} = 96{,}13\ A$$

Фазный ток примерно равен наименьшему току при соединении звездой, некоторое различие итоговых цифр связано с неточным соотношением 380/660. Ток фазный:

$$I\text{ф} = \frac{P\text{квт} \times 1000}{3 \times U_{\triangle} \times \eta \times cos\varphi} = \frac{90 \times 1000}{3 \times 380 \times 0{,}91 \times 0{,}9} = \frac{90000}{291{,}724} = 96{,}394 \approx 96{,}4\ A$$

Плотность тока, при витке *d* 1,5 *мм*. × 7, сечение витка *Sw* = 12,37 *мм*^{2}.:

$$J = \frac{I\text{ф}}{Sw \times a} = \frac{96{,}4}{12{,}37 \times 2} = 3{,}89\ A/\text{мм}^2$$

Линейная нагрузка:

$$AS = \frac{10 \times w\text{п} \times Z \times I\text{ф}}{\pi \times Di \times a} = \frac{10 \times 12 \times 36 \times 96{,}4}{3{,}14159 \times 225 \times 2} = \frac{416448}{1413{,}7155} \approx 294{,}6\ A/\text{см}.$$

Фактор нагрева:

$$\Delta t°C = 3{,}89 \times 294{,}6 \approx 1146$$

Что очень мало для такого диаметра статора, согласно справочным сведениям ~ *Δt°C* 1900 и данных серийных электродвигателей, так например 4А250М2 имеет *Δt°C* 1920. Это означает что этот мотор имеет мощность более чем 90 *квт*.
Так подставив в расчет мощность 110 *квт*., *кпд* и *cosφ* оставим без изменения, так как различие их при 90 и 110 *квт*. не большое, получим токи при соединении △/Y – 204/117,8 *А*. Фазный ток равен наименьшему току при соединении △/Y, т. е. *I*ф = 117,8 *А*. Тогда плотность тока:

$$J = \frac{I\text{ф}}{Sw \times a} = \frac{117{,}8}{12{,}37 \times 2} = 4{,}76\ A/\text{мм}^2$$

Линейная нагрузка, при измененном фазном токе:

$$AS = \frac{10 \times w\text{п} \times Z \times I\text{ф}}{\pi \times Di \times a} = \frac{10 \times 12 \times 36 \times 117{,}8}{3{,}14159 \times 225 \times 2} = \frac{508896}{1413{,}7155} \approx 360\ \ A/\text{см}.$$

Что более ближе к рекомендованной. Фактор нагрева:

$$\Delta t°C = 4{,}76 \times 360 \approx 1714$$

Полученная цифра меньше среднего значения. Если попытаться ее приблизить к 1900, то при этом мощность должна составлять около 115 *квт*., то есть имеется запас по нагрузке около 5 *квт*. Однако в итоговой информации расчета оставим указание на 110 *квт*., так как эта мощность соответствует стандартному ряду мощностей.

По расчету индукции в ярме и воздушном зазоре находятся в нормальных значениях, а в зубцах заметно ниже от средней величины и можно сказать что зубцы не догружены индукцией. Объясняется это тем, что набор статора с такими диаметрами применяется для двигателей меньшей мощности при меньшей длине набора статора.

В правильно рассчитанной и построенной электромашине стремятся к полному использованию материалов и электромагнитных нагрузок.

Пример расчета. Обмер статора поступившего в ремонт электродвигателя: Da = 175 *мм.*, Di = 98 *мм.*, длина статора L = 135 *мм.*, высота ярма hc = 23,5 *мм.*, Z = 30, паз грушевидной формы, высота паза полная hz = 15 *мм.*, $b1$ = 6,4 *мм.*, $b2$ = 8,0 *мм.* Паспорт двигателя отсутствует, заказчик указывает мощность 7,5 *квт*, $2p$ = 2, U = 220/380 *в*. Предположительно двигатель серии АИР, но АИР имеет другое количество пазов и другие размеры статора согласно справочным данным.
Выбираем двухслойную обмотку с укороченным шагом y = 1 – 14, без параллельных ветвей в фазе. Согласно средним и справочным значениям для этого внешнего диаметра и количества полюсов задаемся в воздушном зазоре предварительной индукцией $B\delta'$ = 0,7 *Тл*. Магнитный поток при этом:

$$\Phi' = \frac{B\delta' \times Di \times L}{p \times 10^6} = \frac{0{,}7 \times 98 \times 135}{1 \times 10^6} = 0{,}009261 \text{ Вебер}$$

Коэффициент обмотки kоб. Коэффициент укорочения при выбранном шаге y = 1 – 14:

$$k\text{у} = sin\left(\frac{y\text{к}}{y} \times 90°\right) = sin\left(\frac{13}{15} \times 90°\right) = sin78° = 0{,}97814$$

где yк = 13 выбранный укороченный шаг (1 – 14), а 15 – полный шаг (1 – 16) ($2p/2$).
Коэффициент распределения kр:

$$k\text{р} = \frac{0{,}5}{q \times sin\frac{30°}{q}} = \frac{0{,}5}{5 \times sin\frac{30°}{5}} = \frac{0{,}5}{5 \times sin6°} = \frac{0{,}5}{0{,}52264} = 0{,}95668$$

где пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{30}{2 \times 3} = 5$$

и коэффициент обмотки:

$$k\text{об} = k\text{у} \times k\text{р} = 0{,}97814 \times 0{,}95668 = 0{,}9357$$

Количество витков фазы, предварительно:

$$w'\text{ф} = \frac{ke \times U\text{ф} \times a}{4{,}443 \times f \times k\text{об} \times \Phi'} = \frac{0{,}97 \times 220 \times 1}{4{,}443 \times 50 \times 0{,}9357 \times 0{,}009261} = \frac{213{,}4}{1{,}925044} = 110{,}8546$$

где ke – коэфф. падения напряжения согласно справочным сведениям, f – частота тока, 50 *гц.*, a – параллельных ветвей. Витков в пазе:

$$w\text{п}' = \frac{w\text{ф}' \times 6}{Z} = \frac{110{,}8546 \times 6}{30} = 22{,}17$$

Часть витка намотать не возможно, принимаем wп = 22 витка в пазе, в фазе соответственно wф = 110 витков (wф = (wп × Z)/6). Уточним обратным порядком магнитный поток и проверим индукции.

$$\Phi = \frac{ke \times U\text{ф} \times a}{4{,}443 \times f \times k\text{об} \times w\text{ф}} = \frac{0{,}97 \times 220 \times 1}{4{,}443 \times 50 \times 0{,}9357 \times 110} = \frac{213{,}4}{22865{,}233} = 0{,}0093329 \text{ Вебер}$$

в воздушном зазоре:

$$B\delta = \frac{\Phi \times p \times 10^6}{Di \times L} = \frac{0{,}0093329 \times 1 \times 10^6}{98 \times 135} = \frac{9332{,}9}{13230} = 0{,}7054 \text{ Тл.}$$

индукция в ярме:

$$B\text{c} = \frac{\Phi \times 10^6}{2 \times k\text{c} \times L \times h\text{c}} = \frac{0{,}0093329 \times 10^6}{2 \times 0{,}95 \times 135 \times 23{,}5} = \frac{9332{,}9}{6027{,}75} = 1{,}548 \text{ Тл.}$$

в зубце при его ширине 4,6 *мм.*:

$$Bz = \frac{\Phi \times \pi \times p \times 10^6}{Z \times bz \times L \times kc} = \frac{0{,}0093329 \times 3{,}14159 \times 1 \times 10^6}{30 \times 4{,}6 \times 135 \times 0{,}95} = \frac{29320{,}145311}{17698{,}5} = 1{,}657 \text{ Тл.}$$

Индукции находятся в нормальных значениях, не превышают максимальные, kc – коэффициент заполнения сталью сердечника.

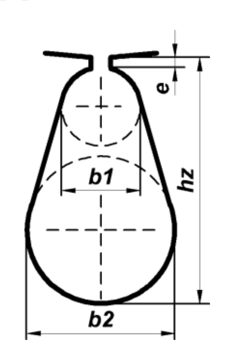


Рис. 30.
Паз к примеру расчета.

Паз грушевидной формы с размерами hz = 15 *мм.*, $b1$ = 6,4 *мм.*, $b2$ = 8,0 *мм.*, e = 0,5 *мм.*, рис. 30. Сечение пространства паза Sп = 92,6 *мм*². При изолировании толщиной пазовой изоляцией толщиной 0,12 + 0,12 *мм.*, прокладка пазовая межфазная 20 × 0,4 *мм.*, клин 5 × 1 *мм.*, остаток для размещения провода составил Sпиз = 74,7 *мм*².

Принимаем виток в два провода. Расчет диаметра проводников при 22 витках в пазе:

$$d\text{из} = \sqrt{\frac{S\text{пиз} \times 0{,}75}{w\text{п} \times n}} = \sqrt{\frac{75{,}8 \times 0{,}75}{22 \times 2}} = 1{,}1366 \text{ мм.}$$

Выбираем провод 1,06 *мм.* с диаметром с изоляцией dиз = 1,157 *мм.*
Обратная проверка коэффициента заполнения паза:

$$k\text{п} = \frac{d_{\text{из}}^2 \times w\text{п} \times n}{S\text{пиз}} = \frac{1{,}157^2 \times 22 \times 2}{75{,}8} = 0{,}777$$

что немного более 0,75 и признаем нормальным. То есть диаметр проводников выбран верно. Виток состоит из двух параллельных проволок 1,06 *мм.*, в пазе 22 витка, при двухслойной обмотке 11 витков в катушке.
Кпд и косинус фи в расчете задаются. Для мощности 7,5 *квт.* принимаем *кпд* = 0,87, cosφ = 0,88. Токи двигателя при работе. при соединении в треугольник:

$$I_{\triangle} = \frac{P\text{квт} \times 1000}{\sqrt{3} \times U_{\triangle} \times \eta \times cos\varphi} = \frac{7{,}5 \times 1000}{1{,}732 \times 220 \times 0{,}87 \times 0{,}88} = \frac{7500}{291{,}724} = 25{,}71\ A$$

при соединении в звезду:

$$I_Y = \frac{P\text{квт} \times 1000}{\sqrt{3} \times U_Y \times \eta \times cos\varphi} = \frac{7{,}5 \times 1000}{1{,}732 \times 380 \times 0{,}87 \times 0{,}88} = \frac{7500}{503{,}887} = 14{,}88\ A$$

Фазный ток примерно равен наименьшему току при соединении звездой, некоторое различие итоговых цифр связано с неточным соотношением 220/380.

$$I\text{ф} = \frac{P\text{квт} \times 1000}{3 \times U_{\triangle} \times \eta \times cos\varphi} = \frac{7{,}5 \times 1000}{3 \times 220 \times 0{,}87 \times 0{,}88} = \frac{7500}{291{,}724} = 14{,}84\ A$$

Плотность тока в витке:

$$J = \frac{I\text{ф}}{Sw \times a} = \frac{14{,}84}{1{,}7642 \times 1} = 8{,}41\ A/\text{мм}^2$$

Линейная нагрузка:

$$AS = \frac{10 \times w\text{п} \times Z \times I\text{ф}}{\pi \times Di \times a} = \frac{10 \times 22 \times 30 \times 14{,}84}{3{,}14159 \times 98 \times 1} = \frac{97944}{307{,}87582} = 318{,}13\ A/\text{см}.$$

Фактор нагрева:

$$\Delta t°C = J \times AS = 8{,}41 \times 318{,}13 \approx 2676$$

Что намного превышает цифру ~1400 рекомендованных значений. Так например двигатель 4А112М2 7,5 *квт* имеет $\Delta t°C$ = 1436. Это значит, что статор с такими размерами, с таким размером паза, при нормальных выбранных индукциях не способен нести в длительном режиме (S1) заявленную мощность. И его нормальная мощность 5,5 *квт*. При 5,5 *квт*. *кпд* и косинус фи несколько иные, принимаем *кпд* = 0,86, cosφ = 0.89. Токи двигателя при работе, при соединении в треугольник:

$$I_{\triangle} = \frac{P\text{квт} \times 1000}{\sqrt{3} \times U_{\triangle} \times \eta \times cos\varphi} = \frac{5{,}5 \times 1000}{1{,}732 \times 220 \times 0{,}86 \times 0{,}89} = \frac{5500}{291{,}648} = 18{,}86\ A$$

при соединении в звезду:

$$I_Y = \frac{P\text{квт} \times 1000}{\sqrt{3} \times U_Y \times \eta \times cos\varphi} = \frac{5{,}5 \times 1000}{1{,}732 \times 380 \times 0{,}86 \times 0{,}89} = \frac{5500}{503{,}755} = 10{,}92\ A$$

Фазный ток примерно равен наименьшему току при соединении звездой, некоторое различие итоговых цифр связано с неточным соотношением 220/380.

$$I\text{ф} = \frac{P\text{квт} \times 1000}{3 \times U_{\triangle} \times \eta \times cos\varphi} = \frac{5{,}5 \times 1000}{3 \times 220 \times 0{,}86 \times 0{,}89} = \frac{5500}{505{,}164} = 10{,}89\ A$$

Плотность тока в витке:

$$J = \frac{I\text{ф}}{Sw \times a} = \frac{10{,}89}{1{,}7642 \times 1} = 6{,}17\ A/\text{мм}^2$$

Линейная нагрузка:

$$AS = \frac{10 \times w\text{п} \times Z \times I\text{ф}}{\pi \times Di \times a} = \frac{10 \times 22 \times 30 \times 10{,}89}{3{,}14159 \times 98 \times 1} = \frac{71874}{307{,}87582} = 233{,}45\ A/\text{см}.$$

Фактор нагрева:

$$\Delta t°C = J \times AS = 6{,}17 \times 233{,}45 \approx 1440$$

То есть подтверждается что реальная мощность электродвигателя 5,5 *квт.*

Весовой подсчет обмоточного провода и подсчет сопротивления фазы.

Ширина катушки, *мм*., где y – принятый шаг обмотки.

$$b\text{к} = \frac{\pi \times (Di + hz) \times y}{Z} = \frac{3{,}14159 \times (98 + 15) \times 13}{30} = 153{,}83 \ \approx 154 \text{ мм.}$$

Средняя длина одной лобовой части, с учетом расстояния выхода катушки из паза *мм*.:

$$L\text{л} = (1{,}16 + 0{,}14 \times p) \times b\text{к} + 15 = (1{,}16 + 0{,}14 \times 1) \times 154 + 15 = 215{,}2$$

где p – пар полюсов. Длина витка обмотки, *мм*.:

$$Lw = (L\text{л} + L) \times 2 = (215{,}2 + 135) \times 2 = 700{,}4 \approx 0{,}7 \text{ м.}$$

Длина фазы

$$L\text{ф} = Lw \times w\text{ф} = 0{,}7 \times 110 = 77{,}0 \text{ метров}$$

Сопротивление фазы постоянному току

$$R\text{ф}_{20} = \frac{\rho \times L\text{ф}}{Sw \times a^2} = \frac{0{,}0175 \times 77{,}0}{1{,}7642 \times 1^2} = 0{,}764 \text{ Ом при } 20°\text{C}$$

Общая длина провода на электродвигатель, на три фазы соответственно:

$$L\text{пм} = Lw \times w\text{ф} \times n \times m = 0{,}7 \ \times 110 \times 2 \times 3 = 462 \text{ м.}$$

Вес обмотки. Вес меди.

$$G\text{м} = \frac{8{,}93 \times w\text{ф} \times Sw \times Lw \times m}{1000} = \frac{8{,}93 \times 110 \times 1{,}7642 \times 0{,}7 \times 3}{1000} \approx 3{,}64 \text{ кг.}$$

Вес изолированного провода:

$$G\text{миз} = \left[0{,}876 + 0{,}124 \times \left(\frac{d\text{из}}{d\text{г}}\right)^2\right] \times G\text{м} = \left[0{,}876 + 0{,}124 \times \left(\frac{1{,}157}{1{,}06}\right)^2\right] \times 3{,}64 = 3{,}73 \text{ кг.}$$

Активное сопротивление фазы при работе, при температуре обмотки 75°C:

$$R\text{ф}_{75} = \frac{kf \times \rho \times (1 \ + \ \alpha \times \Delta t) \times L\text{ф}}{Sw \times a^2} = \frac{1{,}05 \times 0{,}0175 \times (1 \ + \ 0{,}004 \times 55) \times 77}{1{,}7642 \times 1^2} =$$

$$= \frac{1{,}7261475}{1{,}7642} = 0{,}978 \quad \text{Ом}$$

Проверка падения напряжения ke:

$$ke = \frac{U\text{ф} - I\text{ф} \times R\text{ф}_{75}}{U\text{ф}} = \frac{220 - 10{,}89 \times 0{,}978}{220} = 0{,}951$$

Что показывает что ke отличается от ранее принятого в расчете (0,97), однако различие не значительно и пересчета количества витков не требуется.

Пример. Размеры статора *Da* = 131, *Di* = 84, *L* = 98 *мм*., *Z* = 36, форма паза далее на картинке, размеры паза *b*1 = 4,3 *мм*., *b*2 = 6,0 *мм*., *e* = 0,5 *мм*., *hz* = 12,6 *мм*. *hc* = 10,9 *мм*. ширина зубца *bz* = 3,5 *мм*. Напряжение △230/Y400 вольт. Старая обмотка не сохранилась. Толщина набора статора 0,5 *мм*. (*kc* = 0,95) Других данных нет. Приближенное определение полюсов статора:

$$2p = \frac{0{,}5 \times Di}{hc} = \frac{0{,}5 \times 84}{10{,}9} = 3{,}85 \text{ и } 2p = \frac{0{,}35 \times Z \times bz}{hc} = \frac{0{,}35 \times 36 \times 3{,}5}{10{,}9} = 4{,}04$$

Соответственно округлив полученные значения принимаем 2*p* = 4. По методике определения примерной мощности по размеру статора ~ 1,37 *квт*., принимаем стандарт – 1,5 *квт*. и берем для расчета *кпд* = 0,8, *cosφ* = 0,83. Внутренний размер расточки статора мал, поэтому предварительно выбираем однослойную обмотку. Однослойную обмотку можно выполнить полным шагом 1 – 10, смотрите рис. 31.

$$\text{полный шаг} \quad \frac{Z}{2p} = \frac{36}{4} = 9\ (1 - 10) \qquad q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{36}{2p \times 3} = 3$$

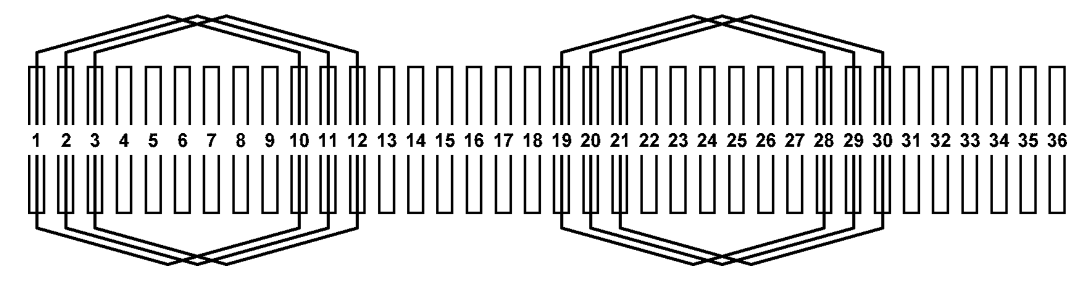


Рис. 31. Пример однослойной обмотки, с полным шагом *y* = 9 (1 – 10), показана одна фаза без соединений.

Шаг желательно сократить. Возможно применить укладку в "развалку", но при нечетном *q* = 3 катушки будут с разными шагами, одна катушка 1 – 8, две катушки с шагом 1 – 9, средний шаг при этом *y* = (7+8+8)/3 = 7,66, смотрите рис. 32.
Можно выполнить концентрическими катушками однослойно. Шаги катушек 1 – 12, 2 – 11, 3 – 10. Средний шаг при этом получается также полный *y* = (11+9+7/3) = 9.

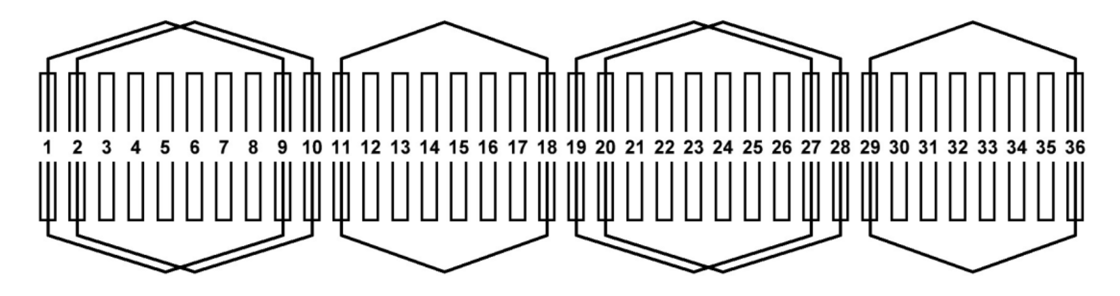


Рис. 32. Однослойная обмотка в "развалку" с разными шагами катушек, показана одна фаза без соединений.

Примем в этом примере цепную обмотку с шагом для всех катушек *y* = 7 (1 – 8), на рисунке 33. Обмотка выполняется без параллельных ветвей, *a* = 1, все катушечные группы соединены последовательно в соответствии с правилом образования полюсов. Коэффициент обмотки в этом случае рассчитывается несколько сложнее. Причина в расширении фазной зоны, одна сторона катушечной группы физически занимают три паза, однако две катушки уложены с пропуском одного паза, см. рис. 33, пазы 8, 9, 10, 11. и в месте образования полюса занимают не 3, а 4 паза.

Одна из сторон катушки заходит в фазный угол соседней фазы. Обычно стороны занимают треть пазов полюса одной фазой, электрических градусов на полюс 180°/3 фазы = 60°. В этом данном случае расширение составляет на один паз. Фазная зона при q = 4 фактически, вместо q = 3:

$$\alpha ф = \frac{180^o \times 2p \times q}{Z} = \frac{180^o \times 4 \times 4}{36} = 80^o$$

коэффициент распределения при этом:

$$k\text{р} = \frac{sin\frac{\text{αф}}{2}}{q \times sin\frac{\text{αф}}{2 \times q}} = \frac{sin\frac{80°}{2}}{4 \times sin\frac{80°}{2 \times 4}} = \frac{sin40°}{4 \times sin\frac{80°}{2 \times 4}} = \frac{sin40°}{4 \times sin10°} = \frac{0,64278}{0,69459} = 0,9254$$

коэффициент укорочения:

$$k\text{у} = sin\left(\frac{\text{ук}}{y} \times 90°\right) = sin\left(\frac{7}{9} \times 90°\right) = sin70° = 0,93969$$

коэффициент обмотки:

$$k\text{об} = k\text{у} \times k\text{р} = 0,93969 \times 0,9254 = 0,869589 \approx 0,8696$$

Коэффициент обмотки ниже, чем было бы при q = 3 (при y = 7,66: *коб* = 0,9337; при y = 9: *коб* = 0,9598) то есть в пазе потребуется несколько больше витков (примерно на 4 – 7%), чем при q = 3, однако немного проще выполнить обмотку, так как все катушки будут одинакового размера, расширение фазной зоны положительно влияет на форму магнитного поля полюса. Но из за повышенного расхода провода цепные обмотки не пользуются популярность при массовом изготовлении электродвигателей.

Согласно справочным данным принимаем предварительно индукцию в возд. зазоре 0,83 *Тл*. Магнитный поток в этом случае, апостроф ' указывает на предварительное значение:

$$\Phi' = \frac{B\delta' \times Di \times L}{p \times 10^6} = \frac{0,83 \times 84 \times 98}{2 \times 10^6} = 0,00341628 \quad \text{Вб}$$

индукция в ярме при этом магнитном потоке:

$$B\text{c}' = \frac{\Phi' \times 10^6}{2 \times k\text{c} \times L \times h\text{c}} = \frac{0,00341628 \times 10^6}{2 \times 0,95 \times 98 \times 10,9} = 1,6832 \text{ Тл.}$$

Что несколько превышает максимальное значение (1,65) для высот вращения 50 – 132 *мм*.
Задаемся индукцией в ярме статора 1,55 *Тл*., магнитный поток при этом:

$$\Phi' = \frac{B\text{c} \times 2 \times k\text{c} \times L \times h\text{c}}{10^6} = \frac{1,55 \times 2 \times 0,95 \times 98 \times 10,9}{1000000} = 0,003145849$$

витков в фазе:

$$w\text{ф}' = \frac{ke \times U\text{ф} \times a}{4,443 \times f \times k\text{об} \times \Phi} = \frac{0,94 \times 230 \times 1}{4,443 \times 50 \times 0,8696 \times 0,003145849} = 355,755$$

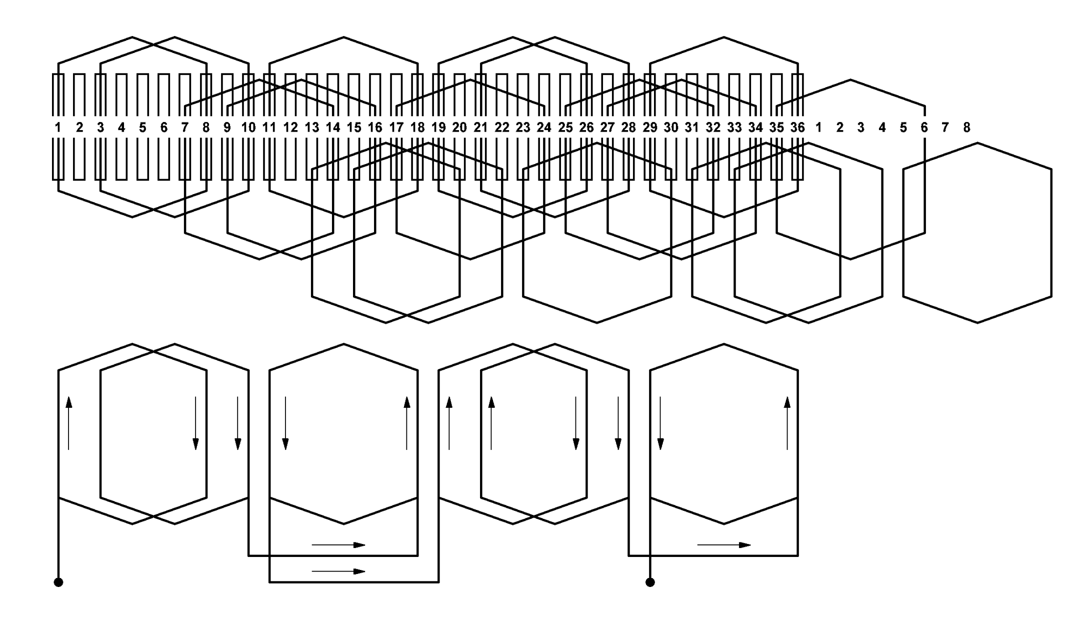


Рис. 33. Цепная однослойная обмотка, y = 7 (1 – 8), Z = 36, 2p = 4.

витков в пазе:

$$w\text{п}' = \frac{w\text{ф}' \times 6}{Z} = \frac{355{,}755 \times 6}{36} = 59{,}2925$$

принимаем 59 витков в пазе (обмотка однослойная), в фазе соответственно wф = 354 (wф = (wп × Z)/6). Обратная проверка, Ф от витков фазы:

$$\Phi = \frac{ke \times U\text{ф} \times a}{4{,}443 \times f \times k\text{об} \times w\text{ф}} = \frac{0{,}94 \times 230 \times 1}{4{,}443 \times 50 \times 0{,}8696 \times 354} = 0{,}00316145$$

Индукция в воздушном зазоре:

$$B\delta = \frac{\Phi \times p \times 10^6}{Di \times L} = \frac{0{,}00316145 \times 2 \times 10^6}{84 \times 98} = 0{,}768 \text{ Тл}$$

в ярме:

$$B\text{с} = \frac{\Phi \times 10^6}{2 \times k\text{с} \times L \times h\text{с}} = \frac{0{,}00316145 \times 10^6}{2 \times 0{,}95 \times 98 \times 10{,}9} = 1{,}557 \text{ Тл.}$$

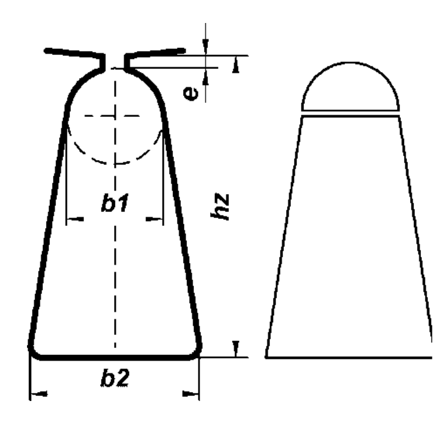
в зубцах:

$$Bz = \frac{\Phi \times \pi \times p \times 10^6}{Z \times bz \times L \times kc} = \frac{0{,}00316145 \times 3{,}14159 \times 2 \times 10^6}{36 \times 3{,}5 \times 98 \times 0{,}95} = 1{,}693 \text{ Тл.}$$

В воздушном зазоре есть некоторый запас по величине индукции. Примем 57 витков в пазе, в фазе соответственно wф = 342, при уменьшении витков (без изменения шага) индукции увеличиваются. Не пересчитывая через уравнения новые индукции найдем через пропорцию 59/57 = 1,035. Тогда:

$B\delta$ = 0,768 × 1,035 = 0,794 *Тл*.
Bc = 1,557 × 1,035 = 1,611 *Тл*.
Bz = 1,639 × 1,035 = 1,696 *Тл*.

В ярме индукция приближена к максимальному значению, если статор электродвигателя в хорошем состоянии, то этот выбор оставляем, в ином случае количество витков необходимо увеличить, вернуться к первоначально рассчитанному.



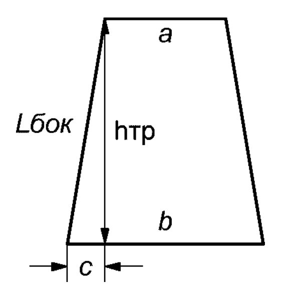


Рис. 34. Паз к примеру расчета. Пояснение к расчету боковой стороны трапеции.

Площадь паза. Форма паза, на рис. 34, состоит из двух фигур, полуокружности и трапеции. Площадь круга, где $D = b1$:

$$S\text{окр} = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{3{,}14159 \times 4{,}3^2}{4} = 14{,}522\ \text{мм}^2$$

полуокружности: 14,522/2 = 7,26 *мм*^{2}.
Высота трапеции:

$$h\text{тр} = hz - e - \frac{b1}{2} = 12{,}6 - 0{,}5 - \frac{4{,}3}{2} = 9{,}95\ \text{мм.}$$

площадь трапеции:

$$S\text{тр} = \frac{a+b}{2} \times h\text{тр} = \frac{4{,}3+6}{2} \times 9{,}95 = 51{,}24\ \text{мм}^2$$

где основания трапеции $b1$ и $b2$. Площадь паза:

$$S\text{паза} = 51{,}24 + 7{,}26 = 58{,}5\ мм^2$$

Длина окружности:

$$L\text{окр} = \pi \times D = 3{,}14159 \times 4{,}3 = 13{,}508\ \text{длина линии полуокружности}\ \frac{13{,}508}{2} = 6{,}75\ \text{мм.}$$

Из основания a опустим прямую образующую прямой угол к основанию b. Получаем треугольник имеющий стороны hтр = 9,95 *мм*.,

$$\text{и сторону}\ c = \frac{b-a}{2} = \frac{6-4{,}3}{2} = 0{,}85\ \text{мм.}$$

где основания $b1$ и $b2$. В прямоугольном треугольнике квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов. Катет hтр = 9,95 *мм*., катет c = 0,85 *мм*. Отсюда длина боковой стороны (гипотенузы):

$$L\text{бок} = \sqrt{9{,}95^2 + 0{,}85^2} = \sqrt{99 + 0{,}722}\ \approx 9{,}98\ \text{мм.}$$

Две боковые стороны трапеции соответственно 9,98 × 2 = 19,96 *мм*. Периметр паза:

две стороны трапеции 19,96 + низ, основание трап. 6 + полуокружность 6,75 = 32,7 *мм*.

Толщина гильзы 0,2 *мм*. Изоляция пазовой коробки (гильзы) соответственно согласно периметра паза займет:

$$0{,}2 \times 32{,}7 \approx 6{,}55\ мм^2$$

Клин пазовый ширина 4 *мм*., толщина 1 *мм*., что займет 4 × 1 = 4 *мм*^{2}. Площадь паза ранее посчитанная 58,5 *мм*^{2}. Оставшаяся площадь паза после изолирования:

$$S\text{пиз} = 58{,}5 - (\text{гильза } 6{,}55 + \text{клин } 4) \approx 48\ мм^2$$

Заполнение паза. Выбор провода. Двигатель небольшой, очевидно виток состоит из одинарного проводника. Диаметр изолированного провода:

$$d\text{из} = \sqrt{\frac{S\text{пиз} \times k\text{п}}{w\text{п} \times n}} = \sqrt{\frac{48 \times 0{,}75}{57 \times 1}} = 0{,}794 \text{ мм.}$$

Выбираем ближайший провод 0,71 *мм*. с внешним диаметром с изоляцией dиз = 0,789 *мм*., обратная проверка kп:

$$k\text{п} = \frac{d_{\text{из}}^2 \times w\text{п} \times n}{S\text{пиз}} = \frac{0{,}789^2 \times 57 \times 1}{48} \approx 0{,}74$$

Токи двигателя при работе, при соединении в треугольник:

$$I_{\triangle} = \frac{P\text{квт} \times 1000}{\sqrt{3} \times U_{\triangle} \times \eta \times cos\varphi} = \frac{1{,}5 \times 1000}{1{,}732 \times 230 \times 0{,}8 \times 0{,}83} = \frac{1500}{264{,}51} = 5{,}67\ A$$

при соединении в звезду:

$$I_{Y} = \frac{P\text{квт} \times 1000}{\sqrt{3} \times U_{Y} \times \eta \times cos\varphi} = \frac{1{,}5 \times 1000}{1{,}732 \times 400 \times 0{,}8 \times 0{,}83} = \frac{1500}{460{,}019} = 3{,}26\ A$$

Фазный ток примерно равен наименьшему току при соединении звездой. Ток фазный:

$$I\text{ф} = \frac{P\text{квт} \times 1000}{3 \times U_{\triangle} \times \eta \times cos\varphi} = \frac{1{,}5 \times 1000}{3 \times 230 \times 0{,}8 \times 0{,}83} = \frac{1500}{458{,}16} = 3{,}27\ A$$

Плотность тока, при витке 0,71 *мм*. × 1, сечение витка Sw = 0,3959 $мм^2$.:

$$J = \frac{I\text{ф}}{Sw \times a} = \frac{3{,}27}{0{,}3959 \times 1} = 8{,}26\ A/\text{мм}^2$$

Линейная нагрузка:

$$AS = \frac{10 \times w\text{п} \times Z \times I\text{ф}}{\pi \times Di \times a} = \frac{10 \times 56 \times 36 \times 3{,}27}{3{,}14159 \times 84 \times 1} = \frac{65923{,}2}{263{,}89356} \approx 250\ A/\text{см.}$$

Фактор нагрева:

$$\Delta t°C = J \times AS = 8{,}26 \times 250 = 2065$$

Полученная цифра заметно превышает среднее ~ 1700, результат расчета не удовлетворительный. Ошибка заключается в не точном коэффициенте падения напряжения ke, взятым в начале расчета. Для уточнения необходимо рассчитать активное сопротивление фазы, которое в свою очередь зависит от длины обмотки фазы. Ширина катушки, *мм*., где y – принятый шаг обмотки:

$$b\text{к} = \frac{\pi \times (Di + hz) \times y}{Z} = \frac{3{,}14 \times (84 + 10{,}9) \times 7}{36} = 57{,}94 \approx 58 \text{ мм.}$$

Длина лобовой части (одной) *мм*.:

$$L\text{л} = (1{,}16 + 0{,}14 \times p) \times b\text{к} + 15 = (1{,}16 + 0{,}14 \times 2) \times 58 + 15 = 98{,}52 \approx 98{,}5 \text{ мм.}$$

где p – пар полюсов. Длина витка обмотки, *мм*.:

$$Lw = (L\text{л} + L) \times 2 = (98{,}5 + 98) \times 2 = 393 \text{ мм.}$$

где L – длина статора, *мм*. Далее подсчет удобнее вести в метрах, значения Lw в *мм*. необходимо разделить на 1000 (393/1000 = 0393). Общая длина одной фазы (всех витков фазы), *метров*:

$$L\text{ф} = Lw \times w\text{ф} = 0{,}393 \times 342 = 132{,}048 \ \approx 134{,}4 \text{ м.}$$

Активное сопротивление фазы статорной обмотки с учетом температуры нагрева обмотки 75°С и коэффициента вытеснения переменного тока:

$$R\text{ф}_{75} = \frac{kf \times \rho \times (1 + \alpha \times \Delta t) \times L\text{ф}}{Sw \times a^2} = \frac{1{,}05 \times 0{,}0175 \times (1 + 0{,}004 \times 55) \times 134{,}4}{0{,}3959 \times 1^2} = 7{,}61 \text{ Ом}$$

Коэффициент падения напряжения, ke:

$$ke = 1 - \frac{I\text{ф} \times R\text{ф}_{75}}{U\text{ф}} = 1 - \frac{3{,}27 \times 7{,}61}{230} \approx 0{,}892$$

отличается от ранее принятого в начале расчете 0,94. Это означает что данные расчета не точны и изменятся при подстановке расчетного ke. Используя соотношение нового/старого ke 0,892/0,94 ≈ 0,95 и пропорциональность подсчитаем изменение от расчетных значений индукций:

$B\delta$ = 0,794 × 0,95 = 0,754 *Тл*.
Bc = 1,611 × 0,95 = 1,53 *Тл*.
Bz = 1,696 × 0,95 = 1,61 *Тл*.

Практически это означает, что возможно количество витков уменьшить для увеличения индукций, ориентируясь на индукцию в ярме, и при этом увеличить диаметр провода для снижения плотности тока в витке. Меньше витков в пазе – больше места для увеличения диаметра. При изменении количества витков и диаметра провода изменятся индукции, сопротивление и ke вновь будет иным и расчет требуется вновь уточнять. При 54 витках в пазе:

$$d\text{из} = \sqrt{\frac{S\text{пиз} \times k\text{п}}{w\text{п} \times n}} = \sqrt{\frac{48 \times 0{,}75}{54 \times 1}} = 0{,}816 \text{ мм.}$$

Примем провод 0,75 *мм*., диаметр с изоляцией 0,834 *мм*.
Проверка коэффициента заполнения:

$$k\text{п} = \frac{d_{\text{из}}^2 \times w\text{п} \times n}{S\text{пиз}} = \frac{0{,}834^2 \times 54 \times 1}{48} \approx 0{,}78$$

Витков в фазе при 54 витках в пазе:

$$w\text{ф} = \frac{w\text{п} \times Z}{6} = \frac{54 \times 36}{6} = 324$$

где Lф длина одной фазы (всех витков одной фазы), *метров*:

$$L\text{ф} = Lw \times w\text{ф} = 0{,}393 \times 324 = 127{,}332 \ \approx 127{,}4 \text{ м.}$$

Активное сопротивление фазы статорной обмотки с учетом температуры нагрева обмотки (75°С – 20°С = разница 55°С) и коэффициента (kf = 1,05) вытеснения переменного тока:

$$R\text{ф}_{75} = \frac{kf \times \rho \times (1 + \alpha \times \Delta t) \times L\text{ф}}{Sw \times a^2} = \frac{1{,}05 \times 0{,}0175 \times (1 + 0{,}004 \times 55) \times 127{,}4}{0{,}4418 \times 1^2} = 6{,}464 \text{ Ом}$$

Коэффициент падения напряжения, *ke*:

$$ke = 1 - \frac{I\text{ф} \times R\text{ф}_{75}}{U\text{ф}} = 1 - \frac{3{,}27 \times 6{,}464}{230} = 0{,}908$$

Тогда, воспользовавшись уравнениями без Ф:

$$B\delta = \frac{0{,}908 \times 230 \times 2 \times 10^6 \times 1}{4{,}443 \times 50 \times 0{,}8696 \times 84 \times 98 \times 324} \approx 0{,}81 \text{ Тл.}$$

$$B\text{c} = \frac{0{,}908 \times 230 \times 10^6 \times 1}{4{,}443 \times 50 \times 0{,}8696 \times 2 \times 0{,}95 \times 98 \times 10{,}9 \times 324} \approx 1{,}64 \text{ Тл.}$$

$$Bz = \frac{0{,}908 \times 230 \times 2 \times 3{,}14159 \times 10^6 \times 1}{4{,}443 \times 50 \times 0{,}8696 \times 36 \times 3{,}5 \times 98 \times 0{,}95 \times 324} \approx 1{,}78 \text{ Тл.}$$

Плотность тока, при витке 0,75 *мм*. × 1, сечение витка = 0,4418 $мм^2$.:

$$J = \frac{I\text{ф}}{Sw \times a} = \frac{3{,}27}{0{,}4418 \times 1} = 7{,}4\ A/\text{мм}^2$$

Линейная нагрузка:

$$AS = \frac{10 \times w\text{п} \times Z \times I\text{ф}}{\pi \times Di \times a} = \frac{10 \times 54 \times 36 \times 3{,}27}{3{,}14159 \times 84 \times 1} = \frac{62391{,}6}{263{,}89356} \approx 240\ A/\text{см.}$$

Фактор нагрева:

$$\Delta t°C = J \times AS = 7{,}4 \times 240 \approx 1776$$

Двигатель работоспособен при ранее рассчитанном повышенном факторе нагрева, но срок службы изоляции, а значит и электродвигателя, при повышенном нагреве уменьшится.

Подсчет потерь в электродвигателе на сопротивлении обмотки.

$$Pcu = I^2 \times R\text{ф}_{75}$$

При сопротивлении фазы при 75°С $R\text{ф}_{75}$ = 6,464 *Ом* и фазном токе электродвигателя 3,27 *А*:

$$Pcu = I^2 \times R\text{ф}_{75} = 3{,}27^2 \times 6{,}464 = 69{,}11 \text{ ватт}$$

на три фазы:

$$69{,}11 \times 3 = 207{,}33 \text{ ватт}$$

Эта мощность будет выделяться в электродвигателе при работе в виде тепла от обмотки. Поэтому важно полное заполнение паза медью, правильный выбор сечения витка.

Проверка количества полюсов от индукций $B\delta$ и Bc:

$$2p = \frac{B\delta \times Di}{Bc \times kc \times hc} = \frac{0{,}81 \times 84}{1{,}64 \times 0{,}95 \times 10{,}9} = \frac{67{,}2}{16{,}7751} = 4{,}006 \approx 4 \text{ полюса}$$

22. Ток холостого хода.

Ток холостого хода является важной оценкой выполненного ремонта. Подсчитать ток холостого хода уравнениями используемые при конструировании электродвигателей не представляется возможным, так как для этого необходимо знать сведения не доступные при ремонте. Поэтому ток холостого хода оценивается приближенно.

Таблица 11. Ток холостого хода, *Iхх*, ампер при 380 *в*.

квт	3000 *об. мин.*	1500 *об. мин.*	1000 *об. мин.*	750 *об. мин.*
0,12	0,12 – 0,25	0,23 – 0,36	0,48 – 0,63	
0,18	0,15 – 0,34	0,34 – 0,5	0,58 – 0,85	
0,25	0,34 – 0,42	0,44 – 0,64	0,62 – 1,0	0,73 – 1,2
0,37	0,38 – 0,52	0,64 – 0,95	1,0 – 1,27	1,15 – 1,6
0,55	0,59 – 0,73	0,81 –1,3	1,2 – 1,6	1,3 – 2,0
0,75	0,65 – 0,88	1,05 – 1,8	1,3 – 1,95	1,6 – 2,58
1,1	0,7 – 1,3	1,43 – 2,0	1,9 – 2,85	1,8 – 3,2
1,5	1,24 – 1,62	1,85 – 2,4	2,1 – 3,6	2,8 – 3,7
2,2	1,3 – 2,1	2,2 – 3,1	3,1 – 3,9	3,1 – 4,1
3,0	1,6 – 2,7	3,1 – 3,9	4,1 – 4,87	4,1 – 5,1
4,0	2,35 – 3,3	4,1 – 4,95	4,6 – 5,1	5,2 – 6,9
5,5	2,6 – 4,1	4,2 – 5,1	5,5 – 6,3	7,4 – 8,2
7,5	4,0 – 6,14	5,1 – 7,8	6,85 – 7,3	9 – 10,7
11	5,5 – 7,3	8,2 – 10,7	8,12 – 10,2	11,2 – 12,9
15	6,5 – 8,8	8,1 – 12,8	10,8 – 13,8	14,7 – 16,8
18,5	6,4 – 11,1	9,5 – 15	12,5 – 15,9	15,4 – 19,5
22	8,0 – 13,2	10 – 16,3	11,8 – 16,3	17,9 – 23,3
30	12,0 – 15,8	14,8 – 20	16,8 – 21,8	24,3 – 31,2
37	14,4 – 18,7	16,1 – 22,8	19,4 – 26,6	25,8 – 33,7
45	16,3 – 21,8	17,4 – 25,8	22,8 – 29,6	33,1 – 42,2
55	20,9 – 29,8	22,7 – 33,9	28,8 – 39,2	42,9 – 54,6
75	27 – 36	28,8 – 38,9	38,7 – 47,3	55,4 – 68,2
90	30,6 – 39	35,3 – 43,6	48,3 – 60,1	65,4 – 70,8
110	36 – 44	42,8 – 48,8	50,2 – 60,3	61,6 – 74,8
132	32 – 48	44,6 – 52,8	50,4 – 63,2	68,1 –75,9

Таблица 12. Средние значения токов холостого хода асинхронных электродвигателей в долях от номинального тока.

Мощность *квт*	Синхронная скорость вращения об. мин.					
	3000	1500	1000	750	600	500
0,1 – 0,5	0,55	0,70	0,80	0,90	0,95	–
0,51 – 1,0	0,40	0,55	0,60	0,65	0,85	0,90
1,1 – 5,0	0,35	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
5,1 – 10	0,25	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
10,1 – 25	0,20	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
25,1 – 50	0,18	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
50,1 – 100	0,18	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45

Примечание. Для крановых электродвигателей величины тока холостого хода выше указанных в этой таблице в 1,3 – 1,4 раза.

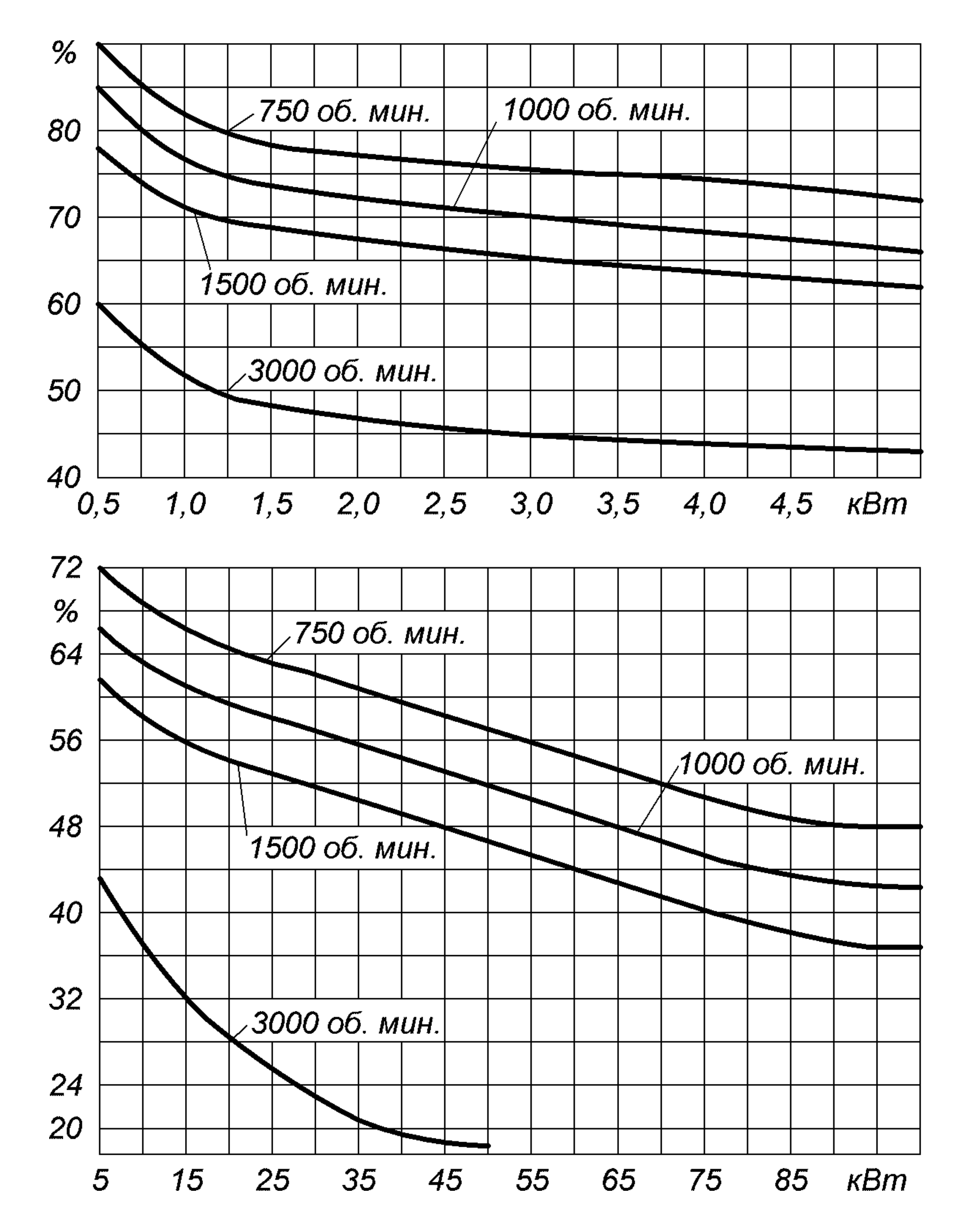
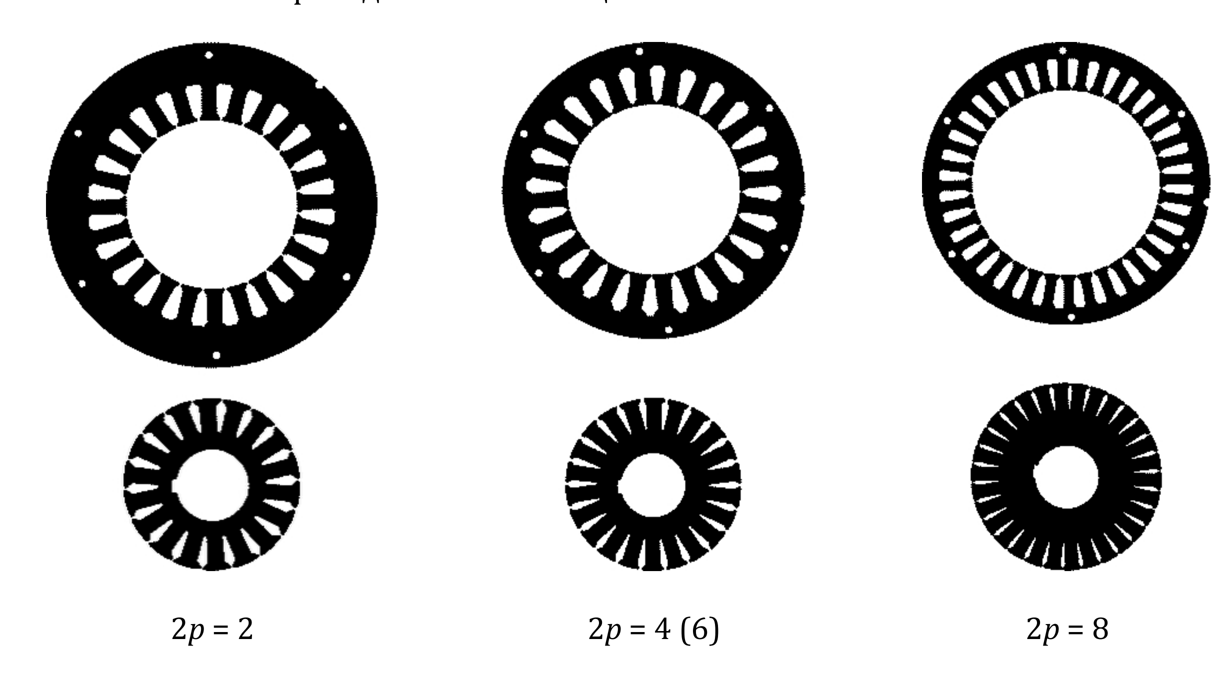


Рис. 35. Ток холостого хода в процентах от номинального тока электродвигателя в зависимости от мощности и количества оборотов. Кривые предельных значений тока холостого хода трехфазных асинхронных двигателей мощностью до 5 и 5 – 100 *квт.*

23. Геометрия статора в зависимости от количества полюсов.

Как показано на рисунке 36 геометрия набора статора и ротора изменяется в зависимости от количества полюсов. Связано это с высотой ярма статора для пропускания достаточного магнитного потока при работе электродвигателя и с рациональным использовании объема электротехнической стали в статоре. Так при двух полюсах высота ярма наибольшая. Плотность магнитного потока в ярме больше в двухполюсном, чем например в шестиполюсном. Так при пересчете шестиполюсного на четырехполюсный или тем более на два полюса можно выполнить расчет на имеющемся статоре только со значительным снижением мощности, что как правило не применяется из-за низкой эффективности такого мотора. Так статор двухполюсного электродвигателя возможно использовать на любое количество полюсов, статор шестиполюсного – только при увеличении количества полюсов.

Промышленные серийные электродвигатели часто выполняются таким образом, что один размер используется на шесть и восемь полюсов, а четырехполюсный размер иногда применяется на шести полюсах. При изменении толщины ярма, при изменении количества полюсов меняется соотношение внешнего диаметра к внутреннему.
Эти соотношения находятся в некоторых пределах и при разработке конструкции им следуют. Для определения полюсности неизвестного статора возможно использовать такие соотношения приведенные в таблице 14.



$2p = 2$ $2p = 4$ (6) $2p = 8$

Рис. 36. Геометрия статора и короткозамкнутого ротора
при разном количестве полюсов.

Соотношение внешнего диаметра к внутреннему статора при числе полюсов. *Di/Da* или *Da/Di*, то есть внутренний диаметр *Di* разделенный на внешний диаметр *Da* и наоборот, внешний диаметр разделенный на внутренний диаметр. Данные исчислены по доступным данным серий асинхронных двигателей.

Таблица 13. Соотношения размеров диаметров статора при количестве полюсов.

серия АО2						
2p	2	4	6	8	10	12
Di/Da	0,53 – 0,59	0,60 – 0,65	0,60 – 0,73	0,69 – 0,73	0,73	–
Dн/Da	1,69 – 1,90	1,54 – 1,66	1,37 – 1,66	1,37 – 1,44	1,37 – 1,38	–
серия 4А						
Di/Da	0,51–0,58	0,57–0,68	0,65–0,73	0,66–0,75	0,75–0,79	0,76–0,79
Dн/Da	1,73–1,98	1,47–1,76	1,38–1,54	1,34–1,53	1,27–1,34	1,27–1,31
серия АИР						
Di/Da	0,53–0,57	0,6–0,65	0,67–0,72	0,68–0,72	–	–
Dн/Da	1,77–1,93	1,52–1,66	1,39–1,49	1,39–1,51	–	–
серия РА						
Di/Da	0,52–0,57	0,58–0,64	0,58–0,71	–	–	–
Dн/Da	1,76–1,94	1,56–1,71	1,42–1,71	–	–	–
серия Y (Китай)						
Di/Da	0,54 – 0,58	0,62 – 0,67	0,66 – 0,73	0,69 – 0,75		
Dн/Da	1,73 – 1,85	1,48 – 1,63	1,37 – 1,51	1,33 – 1,44		

24. Расчет однофазного электродвигателя с конденсатором.

Расчет однофазного электродвигателя сложнее не смотря на кажущуюся простоту, чем трехфазного. Сложность заключается в двух разных обмотках и правильном выборе необходимой емкости конденсатора, расчет раздельно для каждой обмотки плотности тока, фактора нагрева, сопротивления обмоток, распределение общего тока между обмотками. В целом в расчете, при ремонте однофазного асинхронного электродвигателя, используются те же уравнения, что и при расчете трехфазного. Некоторые из них изменены, например расчет шага, коэффициента обмотки и другие, так как хотя приято называть двигатель однофазным, по сути является двухфазным, причем фазы обмоток разные. Подсчет сечения просвета паза, разумеется, так же и для трехфазного. Тепловая нагрузка, индукции, фактор нагрева, аналогично трехфазным, те же значения предпочтительны и для однофазных. Подсчет числа витков в фазе однофазного электродвигателя рассчитывается с использованием тех же уравнений, что и при расчете в трехфазном. Важным в однофазном электродвигателе для расчетов является коэффициент трансформации – соотношение витков между основной и вспомогательной обмоток с учетом коэффициента обмоток.
В однофазных двигателях с постоянно включенном рабочем конденсаторе, основная и вспомогательная обмотки занимают по половине пазов статора.
Пазов основной и вспомогательной обмотки:

$$Z_A \text{ или } Z_B = \frac{Z}{2}$$

В однофазном двигателе с отключаемой вспомогательной обмоткой, главная, рабочая обмотка занимает ⅔ пазов статора, вспомогательная, пусковая обмотка – ⅓ пазов статора:

$$\text{пазов основной обмотки: } Z_A = \frac{2}{3} \times Z = \frac{2 \times Z}{3}$$

$$\text{пазов вспомогательной обмотки: } Z_B = \frac{1}{3} \times Z = \frac{1 \times Z}{3}$$

Z_A – количество пазов занятых основной обмоткой, Z_B – количество пазов занятых вспомогательной обмоткой.


Занятие ⅓ и ⅔ или по ½ - половине пазов общепринятое распределение двух обмоток, но может быть иным. Пазов на полюс и фазу q:

$$\text{основной обмотки: } q_A = \frac{Z_A}{2p}, \quad \text{вспомогательной обмотки: } q_B = \frac{Z_B}{2p}$$

Полный или диаметральный шаг:

$$y_A \text{ или } y_B = \frac{Z}{2p}$$

Шаг также может быть укороченным.
Коэффициент укорочения основной *A* или вспомогательной *B* обмотки так же как в трехфазном:

$$k\text{у}_A \text{ или } k\text{у}_B = sin\left(\frac{\text{ук}}{y} \times 90°\right)$$

или используя альтернативные уравнения как показано ранее в §7.

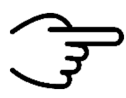
Коэффициент распределения подсчитывается иначе чем в трехфазном, связано это с тем, что обмотки при занятии каждой обмоткой ½ пазов статора занимают фазный угол в 90 электрических градусов, а не типичные 60° в трехфазных.



Коэффициент kр при занятия обмотками *равного количества* пазов статора:

$$k\text{р}_{AB} = \frac{0{,}7071}{q_{AB} \times sin\frac{45°}{q_{AB}}}$$

где $k\text{р}_{AB}$ – коэффициент распределения обмотки A или B, q_{AB} пазов на полюс и фазу обмотки A или B. При равном количестве пазов занятых обмотками пазов на полюс и фазу q также одинаково.



При *не равном* распределение пазов для основной и вспомогательной обмоток коэффициент kр распределения обмоток рассчитывается по иному. Угол αф занимаемый фазой A или B:

$$\alpha\text{ф} = \frac{180° \times 2p \times q_{AB}}{Z}$$

Где αф – угол занимаемый фазой, основной или вспомогательной обмотки, q_{AB} – пазов на полюс и фазу основной или вспомогательной обмотки, Z – количество пазов статора. Коэффициент kр распределения (обмотки A или B):

$$k\text{р}_{AB} = \frac{sin\frac{\alpha\text{ф}}{2}}{q_{AB} \times sin\frac{\alpha\text{ф}}{q_{AB} \times 2}}$$

Коэффициент обмотки есть произведение двух коэффициентов: $k\text{об} = k\text{у} \times k\text{р}$. Коэффициенты обмоток учитываются при определении коэффициента трансформации, при подсчете витков вспомогательной обмотки от количества витков основной обмотки:

$$w_B = k_{\text{ТР}} \times w_A \times \frac{k\text{об}_A}{k\text{об}_B}$$

обратный подсчет:

$$k_{\text{ТР}} = \frac{k\text{об}_B \times w_B}{k\text{об}_A \times w_A}$$

где w_B – витков в фазе вспомогательной обмотки, w_A – витков фазы основной обмотки, $k_{\text{ТР}}$ – коэффициент трансформации, $k\text{об}_A$ и $k\text{об}_B$ – коэффициенты обмоток соответственно основной A и вспомогательной B.
Коэффициент трансформации $k_{\text{ТР}}$ либо задается при расчете или определяется в зависимости от количества витков и их коэффициентов kоб обмоток и имеет важное значение в расчете однофазного электродвигателя, им определяется распределение общего тока электродвигателя между основной обмоткой и вспомогательной при работе.

Число витков:

в пазе от витков в фазе: $N_{AB} = \frac{2 \times w_{AB}}{Z_{AB}}$, витков фазы от витков в пазе: $w_{AB} = \frac{N_{AB} \times Z_{AB}}{2}$

где Z_{AB} – число пазов занимаемое обмоткой A или B.

Ток однофазного электродвигателя, общий ток основной и вспомогательной обмотки:

$$I = \frac{P}{U \times \eta \times cos\varphi}$$

U – напряжение питания, η – *кпд* двигателя, $cos\varphi$ – косинус фи, этими значениями следует задаваться используя справочные сведения или паспорт двигателя.
Ток двигателя складывается из токов обеих обмоток при сумме их квадратов:

$$I = \sqrt{I_A^2 + I_B^2}$$

Распределение тока между обмотками согласно коэффициенту трансформации $k_{ТР}$:

ток основной обмотки:

$$I_A = \frac{k_{ТР} \times I}{\sqrt{1 + k_{ТР}^2}}$$

ток вспомогательной обмотки:

$$I_B = \frac{I}{\sqrt{1 + k_{ТР}^2}}$$

где I – ток номинальный двигателя (обеих фаз). I_A, I_B – ток номинальный фаз A и B, $k_{ТР}$ – коэффициент трансформации, соотношение между обмотками.
Согласно токам вычисляется плотность тока, фактор нагрева в обмотках.
Линейная нагрузка:

$$A_{AB} = \frac{10 \times I_{AB} \times N_{AB}}{a \times tz}, \qquad \text{где } tz = \frac{\pi \times Di}{Z_{AB}}$$

или

$$A_{AB} = \frac{10 \times N_{AB} \times Z_{AB} \times I_{AB}}{Di \times \pi \times a}$$

где A_{AB} – линейная нагрузка $A/см$. основной A_A или A_B вспомогательной обмоток, 10 – множитель, N_{AB} – количество витков в пазе обмотки A или B, Z_{AB} – количество пазов занимаемые обмоткой A или B, I_{AB} – ток в обмотке A или B, tz – пазовое деление, часть длины окружности приходящейся на паз с зубцом *мм*., Di – внутренний диаметр статора, *мм*., a – количество параллельных ветвей в фазе. В однофазных электродвигателях как правило, из–за небольшой их мощности, параллельных ветвей в фазах не делают.
Средние значения линейной нагрузки однофазных электродвигателей:

$2p = 2$: $A = 105 \div 125$, до 150 $A/см$.
$2p = 4$: $A = 120 \div 165$, до 200 $A/см$.

Фактор нагрева подсчитывается также как в трехфазном для каждой обмотки A или B. см. §16. Фактор нагрева, пропуская отдельные подсчеты линейной нагрузки и плотности тока:

$$\Delta t^{o}C = \frac{10 \times I_{AB}^2 \times N_{AB} \times Z_{AB}}{Sw_{AB} \times a \times \pi \times Di}$$

Sw_{AB} – сечение витка обмотки A или B, $мм^2$.

Пример расчета однофазного электродвигателя с постоянно включенным конденсатором во вспомогательной обмотке.

Электродвигатель однофазный, при поступлении в ремонт обмотка отсутствует, на паспорте указана мощность 550 *ватт*, охлаждение обдувом вентилятором на валу, напряжение U = 230 *в*., $2p$ = 4, Da = 120 *мм*., Di = 70 *мм*., L = 67 *мм*., Z = 24, высота паза hz = 14 *мм*., площадь просвета паза голого 85 *мм*^{2}., изолированного 72 *мм*^{2}, ширина зубца bz = 5 *мм*., высота ярма hc = 11 *мм*., емкость конденсатора не известна.
В начале необходимо выбрать вид и тип обмотки, так как от этого в дальнейшем будут зависеть параметры расчета. Размеры статора в однофазных электродвигателях небольшого размера и поэтому типичная обмотка однослойная. При постоянно включенном конденсаторе обмотки занимают по половине количества пазов статора:

$$Z_A \text{ или } Z_B = \frac{Z}{2} = \frac{24}{2} = 12$$

Пазов на полюс и фазу q:

$$\text{основной обмотки: } q_A = \frac{Z_A}{2p} = \frac{12}{4} = 3, \text{вспомогательной обмотки: } q_B = \frac{Z_B}{2p} = \frac{12}{4} = 3$$

Полный или диаметральный шаг:

$$y_A \text{ или } y_B = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

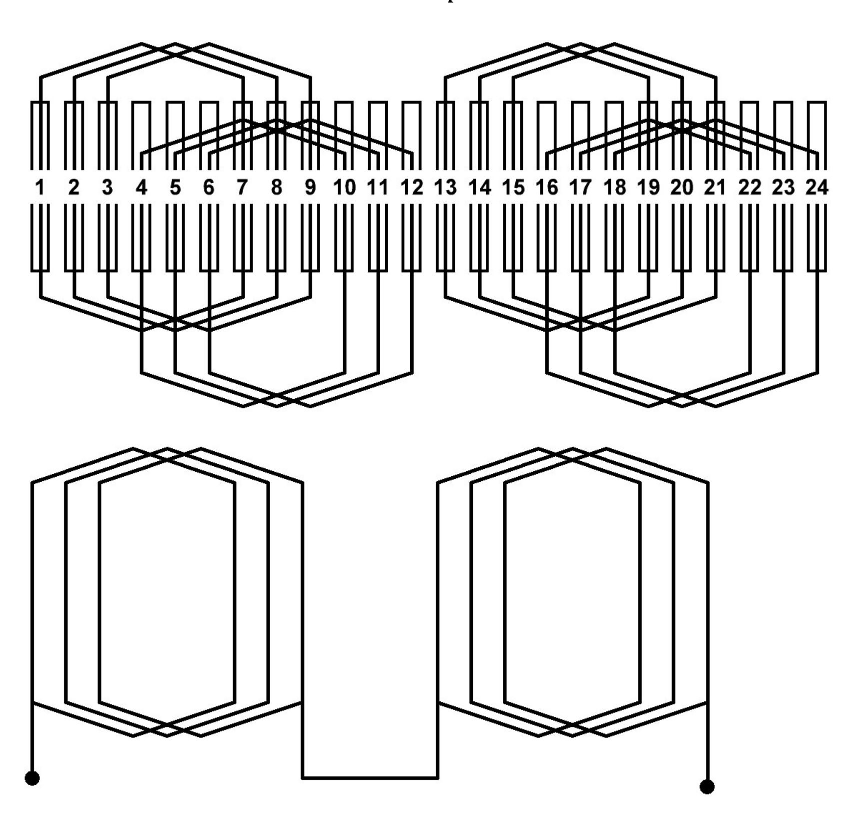


Рис. Обмотка однофазного электродвигателя, Z = 24, $2p$ = 4, y = 6 (1 – 7).

Коэффициент укорочения:

$$ky_A \text{ или } ky_B = sin\left(\frac{ук}{y} \times 90°\right) = sin\left(\frac{6}{6} \times 90°\right) = 1$$

Шаги обмоток одинаковы, и имеют полный, не укороченный шаг, то коэффициент укорочения отсутствует, то есть равен 1.

Коэффициент распределения при занятия обмотками *равного количества* пазов статора:

$$k\text{р}_{AB} = \frac{0{,}7071}{q_{AB} \times sin\frac{45°}{q_{AB}}} = \frac{0{,}7071}{3 \times sin\frac{45°}{3}} = \frac{0{,}7071}{0{,}77645} = 0{,}9107$$

Обмотки занимают одинаковое, половинное количество пазов статора, поэтому значение верно для обмотки A и для обмотки B, и обмоточный коэффициент будет одинаков:

$$k\text{об}_{AB} = k\text{у}_{AB} \times k\text{р}_{AB} = 1 \times 0{,}9107 = 0{,}9107$$

Количество витков в фазе A:

$$w_A = \frac{ke \times U \times p \times 10^6 \times a}{4{,}443 \times f \times k\text{об}_A \times Di \times L \times B\delta_A} = \frac{0{,}92 \times 230 \times 2 \times 10^6 \times 1}{4{,}443 \times 50 \times 0{,}9107 \times 70 \times 67 \times 0{,}8} = 557{,}52$$

где $B\delta_A$ – предварительно заданная индукция в воздушном зазоре 0,8 *Тл.*, ke – падение напряжения в обмотке. Число витков уточненное:

в пазе от витков в фазе: $N_A = \frac{2 \times w_A}{Z_A} = \frac{2 \times 557{,}52}{12} = 92{,}92$ принимаем 94 витка,

тогда витков фазы от витков в пазе: $w_A = \frac{N_A \times Z_A}{2} = \frac{94 \times 12}{2} = 564$

Уточненная индукция в воздушном зазоре при уточненном количестве витков:

$$B\delta_A = \frac{ke \times U \times p \times 10^6 \times a}{4{,}443 \times f \times k\text{об}_A \times Di \times L \times w_A} = \frac{0{,}92 \times 230 \times 2 \times 10^6 \times 1}{4{,}443 \times 50 \times 0{,}9107 \times 70 \times 67 \times 564} = 0{,}79 \text{ Тл.}$$

или через простую пропорцию:

$$\frac{557{,}52}{564} \times 0{,}8 = 0{,}79 \text{ Тл.}$$

В таком случае индукции в ярме и зубцах обмотки A:

$$B\text{c}_A = \frac{ke \times U \times 10^6 \times a}{4{,}443 \times f \times k\text{об}_A \times 2 \times k\text{c} \times L \times h\text{c} \times w_A} =$$

$$= \frac{0{,}92 \times 230 \times 10^6 \times 1}{4{,}443 \times 50 \times 0{,}9107 \times 2 \times 0{,}95 \times 67 \times 11 \times 564} = 1{,}324 \text{ Тл.}$$

$$Bz_B = \frac{ke \times U \times p \times \pi \times 10^6 \times a}{4{,}443 \times f \times k\text{об}_A \times Z \times bz \times L \times kc \times w_A} =$$

$$= \frac{0{,}92 \times 230 \times 2 \times 3{,}14159 \times 10^6 \times 1}{4{,}443 \times 50 \times 0{,}9107 \times 24 \times 5 \times 67 \times 0{,}95 \times 564} = 1{,}525 \text{ Тл.}$$

где kc – коэффициент заполнения сталью статора, hc – высота ярма, *мм.*, bz – ширина зубца, *мм*.

В однофазном электродвигателе с постоянно включенным конденсатором витков вспомогательной обмотки обычно больше количества витков основной обмотки.
Коэффициент трансформации принимаем 1,15. Количество витков вспомогательной обмотки B:

$$w_B = k_{\text{ТР}} \times w_A \times \frac{k\text{об}_A}{k\text{об}_B} = 1{,}15 \times 564 \times \frac{0{,}9107}{0{,}9107} = 648{,}6$$

тогда:

в пазе от витков в фазе: $N_B = \frac{2 \times w_B}{Z_B} = \frac{2 \times 648{,}6}{12} = 108{,}1$ принимаем 108 витков, тогда

витков фазы от витков в пазе: $w_B = \frac{N_B \times Z_B}{2} = \frac{108 \times 12}{2} = 648$

Индукции вспомогательной обмотки проверять нет необходимости, так как количество витков, в этом случае, больше чем основной обмотки при том же шаге и количества пазов на полюс и фазу и поэтому индукции будут ниже.

Диаметры проводников обмоток A и B по заполнению изолированного паза, сечение изолированного просвета паза 72 *мм*², принимаем коэффициент заполнения паза 0,75, тогда диаметр проводника основной обмотки A:

$$d\text{из}A = \sqrt{\frac{S\text{пиз} \times k\text{п}}{N_A \times n}} = \sqrt{\frac{72 \times 0{,}75}{94 \times 1}} = 0{,}7579 \text{ мм.}$$

принимаем провод диаметром 0,67, сечение 0,35257 *мм*². диаметр с изоляцией 0,749 *мм*.

$$\text{обратная проверка: } k\text{п} = \frac{d_{\text{из}}^2 \times N_A \times n}{S\text{пиз}} = \frac{0749^2 \times 94 \times 1}{72} = 0{,}732$$

диаметр провода обмотки B:

$$d\text{из}B = \sqrt{\frac{S\text{пиз} \times k\text{п}}{N_A \times n}} = \sqrt{\frac{72 \times 0{,}75}{108 \times 1}} = 0{,}707 \text{ мм.}$$

принимаем провод 0,63/0,704 *мм*., сечение 0,31172 *мм*².

$$\text{обратная проверка: } k\text{п} = \frac{d_{\text{из}}^2 \times N_B \times n}{S\text{пиз}} = \frac{0{,}704^2 \times 108 \times 1}{72} = 0{,}743$$

Обмотки в данном примере одинаковы по количеству катушек и длина проводника в фазах так же одинаковы 0,18 метров. Сопротивление при 20°C фазы A – 5,03 *Ом*, фазы B – 6,54 *Ом*. Методика расчета длины и сопротивления дана в §17.
Ток электродвигателя из сети, согласно принятым *кпд* 0,64 и *cosφ* 0,98:

$$I = \frac{P}{U \times \eta \times cos\varphi} = \frac{550}{230 \times 0{,}64 \times 0{,}98} = 3{,}812 \text{ ампер}$$

Ток двигателя складывается из токов обеих обмоток при сумме их квадратов:

$$I = \sqrt{I_A^2 + I_B^2}$$

Распределение тока между обмотками согласно коэффициенту трансформации $k_{\text{ТР}}$.
Ток основной обмотки:

$$I_A = \sqrt{\frac{I^2}{1+\frac{1}{k_{\text{ТР}}}}} = \sqrt{\frac{3{,}812^2}{1+\frac{1}{1{,}15}}} = 2{,}787 \text{ ампер}$$

ток вспомогательной обмотки:

$$I_B = \sqrt{\frac{I^2}{1+\frac{1}{k_{\text{ТР}}}} \times \frac{1}{k_{\text{ТР}}}} = \sqrt{\frac{3{,}812^2}{1+\frac{1}{1{,}15}} \times \frac{1}{1{,}15}} = 2{,}59 \text{ ампер}$$

проверка:

$$I = \sqrt{I_A^2 + I_B^2} = \sqrt{2{,}787^2 + 2{,}59^2} = \sqrt{7{,}7673 + 6{,}758} = 3{,}811$$

другие формулы:

$$I_A = \frac{I \times k_{\text{ТР}}}{\sqrt{1+k_{\text{ТР}}^2}} = \frac{3{,}812 \times 1{,}15}{\sqrt{1+1{,}15^2}} = \frac{4{,}3838}{1{,}52397} = 2{,}876$$

$$I_B = \frac{I}{\sqrt{1+k^2}} = \frac{3{,}812}{\sqrt{1+1{,}15^2}} = \frac{3{,}812}{1{,}52397} = 2{,}501$$

проверка:

$$I = \sqrt{I_A^2 + I_B^2} = \sqrt{2{,}876^2 + 2{,}501^2} = \sqrt{8{,}2713 + 6{,}255} = 3{,}811$$

Фактор нагрева для обмотки A и B подсчитаем без расчета плотности тока и линейной нагрузки: (см. §13 и 15):

$$\Delta t^{\circ}C_A = \frac{10 \times I_A^2 \times N_A \times Z_A}{Sw_A \times a \times \pi \times Di} = \frac{10 \times 2{,}78^2 \times 94 \times 12}{0{,}35257 \times 1 \times 3{,}14159 \times 70} = 1124$$

$$\Delta t^{\circ}C_B = \frac{10 \times I_B^2 \times N_B \times Z_B}{Sw_B \times a \times \pi \times Di} = \frac{10 \times 2{,}6^2 \times 108 \times 12}{0{,}31172 \times 1 \times 3{,}14159 \times 70} = 1278$$

что вполне удовлетворительно для двигателя имеющий обдув, ниже среднего справочного значения для такого количества полюсов и внешнего диаметра и означает что размер статора соответствует мощности, выбор проводников сделан правильно и есть некоторый запас по мощности (~ 50 ватт). Полное сопротивление обмоток:

$$R_{ZA} = \frac{U}{I_A} = \frac{230}{2{,}78} = 82{,}73 \text{ Ом} \quad R_{ZB} = \frac{U}{I_B} = \frac{230}{2{,}6} = 88{,}46 \text{ Ом}$$

Полное сопротивление или импеданс состоит из сумм реактивного и активного сопротивления, реактивным здесь является индуктивное сопротивление.

$$R_Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

отсюда, индуктивное сопротивление X_L составит:

$$X_{LA} = \sqrt{R_{ZA}^2 - R^2} = \sqrt{82{,}73^2 - 5{,}03^2} = \sqrt{6844{,}25 - 25{,}3} \approx 82{,}58 \text{ Ом}$$

$$X_{LB} = \sqrt{R_{ZB}^2 - R^2} = \sqrt{88{,}46^2 - 6{,}54^2} = \sqrt{7825{,}17 - 42{,}77} \approx 88{,}22 \text{ Ом}$$

Реактивное сопротивление конденсатора равна сумме индуктивных сопротивлений обмоток:

$$X_{LAB} = 82{,}58 + 88{,}22 = 170{,}8 \text{ Ом}$$

отсюда емкость конденсатора:

$$C = \frac{10^6}{2 \times \pi \times f \times X_{LAB}} = \frac{1000000}{2 \times 3{,}14159 \times 50 \times 170{,}8} = 18{,}63\ \mu F$$

Найденное значение емкости является минимальным необходимым расчетным для работы, но может быть больше, так большее значение емкости увеличивает пусковой момент, тягу на валу при пуске. Так же для еще большего, значительного увеличения пускового момента, параллельно рабочему конденсатору на время запуска 1 – 5 секунд, используя центробежный выключатель или токовое реле, подключают дополнительный конденсатор емкостью в 3 – 5 раз больше.

Имея обмотанный электродвигатель, расчет емкости с использованием значений реактивного сопротивления можно провести с использованием практически измеренных значений индуктивности обмоток (и активного сопротивления) *RCL* – измерителем. Замер следует выполнять со вставленным ротором в статор. Как видно из расчета активное сопротивление мало влияет на полное сопротивление обмоток и им можно пренебречь.

Индуктивное сопротивление зависит от величины индуктивности L:

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times L$$

Отсюда индуктивность фазы:

$$L = \frac{X_L}{2 \times \pi \times f}$$

Например для выше приведенного примера индуктивность фаз (расчетная):

$$L_A = \frac{X_{LA}}{2 \times \pi \times f} = \frac{82{,}58}{2 \times 3{,}14159 \times 50} = 0{,}2628\ H$$

$$L_B = \frac{X_{LB}}{2 \times \pi \times f} = \frac{88{,}22}{2 \times 3{,}14159 \times 50} = 0{,}2808\ H$$

где π – число "пи", f – частота тока (50 *гц.*), L – индуктивность в Генри (H).

Нахождение емкости конденсатора возможно другими способами. Когда найден конденсатор правильного размера напряжение на конденсаторе должно быть на 10 процентов выше при работе и расчетной нагрузке, чем напряжение на пусковой обмотке. При практическом подборе на двигателе напряжение должно быть считано как можно быстрее, потому что значения будут меняться по мере нагрева обмоток.

Исходя из этого, для выше приведенного примера используя расчетный импеданс вспомогательной фазы значение емкости конденсатора составит:

$$C = \frac{10^6}{2 \times \pi \times f \times (R_{ZB} \times 1{,}1 + R_{ZB})} = \frac{10^6}{2 \times 3{,}14159 \times 50 \times (88{,}46 \times 1{,}1 + 88{,}46)} = 17{,}13\ \mu F$$

где R_{ZB} – полное сопротивление вспомогательной фазы B, 1,1 – множитель соответствующий прибавке в 10 процентов.

Вариант с использованием коэффициента трансформации:

$$C = \frac{10^6}{2 \times \pi \times f \times (X_{LA} \times k_{\text{ТР}} + X_{LB})} = \frac{10^6}{2 \times 3{,}14159 \times 50 \times (82{,}58 \times 1{,}15 + 88{,}22)} = 17{,}37\ \mu F$$

Вариант с использованием расчетного тока через вспомогательную обмотку:

$$C = \frac{I_B \times 10^6}{4 \times \pi \times f \times U} = \frac{2{,}6 \times 10^6}{4 \times 3{,}14159 \times 50 \times 230} = 18\ \mu F$$

где I_B – расчетный ток вспомогательной обмотки B.

Вариант с учетом разницы реактивного индуктивного и реактивного емкостного сопротивлений. Так как итоговый результат равен разнице их значений, другими словами одно реактивное сопротивление поглощает другое в зависимости от того что больше. То есть реактивное сопротивление емкости должно быть такой величины, что бы вычитая из нее индуктивное сопротивление должно остаться значение сопротивления равное расчетному индуктивному сопротивлению вспомогательной обмотки.

$$C = \frac{10^6}{(R_{ZB} + X_{LB}) \times 2 \times \pi \times f} = \frac{10^6}{(88{,}46 + 88{,}22) \times 2 \times 3{,}14159 \times 50} = 18{,}01\ \mu F$$

где R_{ZB} – импеданс вспомогательной обмотки, сумма активного и реактивного сопротивления, X_{LB} – реактивное, индуктивное расчетное сопротивление вспомогательной обмотки.

Как показано в примерах нахождения емкости конденсатора все варианты показывают почти одинаковое значение емкости с незначительным расхождением для выше приведенного расчета.

Рабочее напряжение конденсатора должно быть больше чем напряжение питания. Связано это с броском тока из за индуктивно-емкостной цепи при выключении питания однофазного конденсаторного электродвигателя, справедливо и для отключаемых пусковых конденсаторов. Для напряжения питания 220–230 вольт типичные напряжения конденсаторов постоянно включенных не менее 350 *в*., для отключаемых – 450 *в*. Обычно используются конденсаторы предназначенные для использования в работе однофазных электродвигателей имеющих некоторый запас электрической прочности при пиках напряжения и тока. Конечно может быть применен конденсатор с бóльшим рабочим напряжением, при большем напряжении конденсатора его стоимость выше.

Напряжение на зажимах постоянно включенного конденсатора выше напряжения сети и определяется следующей формулой:

$$U_{cap} = U \times \sqrt{1 + k_{\text{ТР}}^2} = 230 \times \sqrt{1 + 1{,}15^2} \approx 350\ \text{в}$$

где: U – напряжение питания двигателя, kтр – коэффициент трансформации.
Напряжение на отключаемом конденсаторе:

$$U_{cap} = I_B \times X_C = 2{,}6 \times 176{,}18 \approx 458 \text{ в}$$

I_B – ток рабочей обмотки, X_C – реактивное сопротивление емкости.

Реактивное сопротивление емкости, например для выбранной 18 μF:

$$R_C = \frac{10^6}{2 \times \pi \times f \times C} = \frac{1000000}{2 \times 3{,}14159 \times 50 \times 18} = 176{,}18 \text{ Ом}$$

Литература.

Не смотря на некоторое устаревание информации в книгах изданных несколько десятилетий назад, в части применяемых размеров обмоточных проводов, типов материалов изоляции, материалов при ремонте, оборудования и прочее, математические примеры, порядок действий, приемы ремонта, разновидности обмоток остаются актуальными в настоящее время.

1. Андриевский С. К., Шапиро М. Н.
"Ремонт электрических машин и пускорегулирующей аппаратуры" 1959
https://archive.org/details/1959_20230411

2. Бабенко Д. А., Тепленко С. И, Чибишев Л. Д.
"В помощь электрику обмотчику асинхронных электродвигателей" 1965
https://archive.org/details/1965_20230411

3. Балагуров В. А.
"Проектирование специальных электрических машин переменного тока" 1982
https://archive.org/details/1982_20230815

4. Винников И. М. "Технология и расчеты при ремонте двигателей переменного тока" 1970
https://archive.org/details/1970_20210714

5. Виноградов Н. В. "Обмотчик электрических машин" 1958
https://archive.org/details/1958_20230408

6. Виноградов Н. В.
"Электрослесарь по ремонту и монтажу промышленного оборудования" 1959
https://archive.org/details/1959_20220807

7. Виноградов Н. В. "Обмотчик электрических машин" 1969
https://archive.org/details/1969_20230408

8. Голдберг О. Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С.
"Проектирование электрических машин", 1984
https://archive.org/details/1984_20240104

9. Гурин Я. С., Кузнецов Б. И. "Проектирование серий электрических машин", 1978
https://archive.org/details/1978_20240104

10. Дьяков В. И. "Типовые расчеты по электрооборудованию" 1991
https://archive.org/details/1991_20230411

11. Жерве Г. К. "Расчет асинхронного двигателя при ремонте" 3е изд. 1959
https://archive.org/details/1959_20220608

12. Жерве Г. К. "Как рассчитать обмотку статора асинхронного двигателя при ремонте" 1960
https://archive.org/details/1960_20230411

13. Жерве Г. К. "Обмотки электрических машин, основы устройства, теории и работы" 1989
https://archive.org/details/1989_20220808_202208

14. Зимин В. И. и др., "Обмотки электрических машин", 1970
https://archive.org/details/1970_20220803

15. Кацман М. М. "Расчет и конструирование электрических машин" 1984
https://archive.org/details/1984_20230411

16. Кацман М. М. "Электрические машины и трансформаторы" 1990
https://archive.org/details/1990_20221120

17. Кокорев А. С. "Справочник молодого обмотчика электрических машин" 5е изд., 1979
https://archive.org/details/5-1979

18. Кокорев А. С. "Справочник молодого обмотчика электрических машин" 6е изд., 1985
https://archive.org/details/6-1985

19. Кравчик А. Э., Шлаф М. М., Афонин В. И., Соболенская Е. А.
"Асинхронные двигатели серии 4А" 1982
https://archive.org/details/4_20240104_20240104_1830

20. Колосков Ю. В. "Провода обмоточные круглые, справочные сведения", 2024
https://archive.org/details/20240104_20240104_2023

21. Колосков Ю. В. "Расчет синусной обмотки", (2022) изм. 2024
https://archive.org/details/20240106_20240106_0706

22. Кузнецов Б. В., Сацукевич М. Ф. "Справочное пособие заводского электрика" 1978
https://archive.org/details/1978_20240104_202401

23. Кузнецов Б. В., Сацукевич М. Ф.
"Асинхронные электродвигатели и аппараты управления" 1982
https://archive.org/details/1982_20230410

24. Лопухина Е. М., Сомихина Г. С.,
"Расчет асинхронных микродвигателей однофазного и трехфазного тока" 1961
https://archive.org/details/1961_20210816

25. Маршак Е. Л. "Ремонт обмоток статоров электрических машин переменного тока" 1966
https://archive.org/details/1966_20230410

26. Маршак Е. Л. "Схемы обмоток статоров" 1967
https://archive.org/details/1967_20230410

27. Маршак Е. Л. "Ремонт и модернизация асинхронных двигателей" 1970
https://archive.org/details/1970_20230410_202304

28. Маршак Е. Л. "Ремонт всыпных обмоток асинхронных двигателей" 1975
https://archive.org/details/1975_20230410

29. Маршак Е. Л. "Расчет асинхронных двигателей при ремонте" 1974
https://archive.org/details/1974_20230410_202304

30. Маршак Е. Л. "Схемы обмоток машин переменного тока" 1974
https://archive.org/details/1974_20230410

31. Перельмутер М. П. "Электромонтер–обмотчик и изолировщик по ремонту электрических машин и трансформаторов" 1984 г.
https://archive.org/details/1984_20230410

32. Сергеев П. С., Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А.
Проектирование электрических машин. Изд. 3–е, 1970.
https://archive.org/details/1970_20240104

33. Сердешнов А. П.
"Ремонт электрооборудования. Ремонт электрических машин, часть 1", 2008
https://archive.org/details/i–2008

34. Слоним Н. М. "Алюминиевые провода при ремонте асинхронных двигателей" 1973
https://archive.org/details/1973_20220902

35. Тембель П. В., Геращенко Г. В.
"Справочник по обмоточным данным электрических машин и аппаратов" 3е изд., 1981
https://archive.org/details/1981_20220121_202201

36. Цибулевский И. П. "Обмоточные данные асинхронных двигателей" 1971
https://archive.org/details/1971_20220617

37. Тан Цзиньпэн и др. "Ремонт обмоток электродвигателя", 2012 г.
На китайском языке, большое количество круговых схем обмоток, справочные сведения электродвигателей производства КНР.

1 том https://archive.org/details/book–1–electric–motor–winding–maintenance–2012
2 том https://archive.org/details/book–2–electric–motor–winding–maintenance–2012
3 том https://archive.org/details/book–3–electric–motor–winding–maintenance–2012

38. Тан Цзиньпэн и др., "Ремонт обмоток электродвигателя, справочное руководство по техническим данным", 2017. На китайском языке, круговые схемы обмоток, справочные сведения электродвигателей производства КНР.
https://archive.org/details/electric–motor–winding–2017

39. Rosenberg Robert, Hand August, "Electric motor repair", 1986
На английском языке. Большое количество схем, картинок.
https://archive.org/details/electric–motor–repair–rosenberg–1986–600dpi

40. История асинхронного электродвигателя, статья. 2022
https://archive.org/details/20220719_20220719

41. Электрические основные формулы, закона Ома.
https://archive.org/details/20240115_20240115_0213

42. Обмоточные данные электродвиг. устаревших серий АО2 АОЛ2 АОТ2 АОП2 АОС2 А2.
https://archive.org/details/2-2-2-2-2-a-2_202408

43. Обмоточные данные электродвигателей серии 4А.
https://archive.org/details/4_20240108

44. Обмоточные данные электродвигателей серии АИР.
https://archive.org/details/a_20240130

45. Таблицы обмоточных данных электродвигателей производства КНР, часть 1
https://archive.org/details/20240108_20240108_0053

46. Таблицы обмоточных данных электродвигателей производства КНР, часть 2
https://archive.org/details/2_20250208_20250208_0154

47. Цеховая документация, практические данные, некоторые технологии ремонтного цеха 51, 2000.
https://archive.org/details/20221110_20221110_2328

48. Некоторые сведения двигателей серии РА, 6А.
https://archive.org/details/pa–6–a

49. Харитонов А. М.
"Многоскоростные двигатели в промышленных электроприводах" 1971 г.
https://archive.org/details/1971_20230410

50. Примеры повреждения статорных обмоток.
https://archive.org/details/1_20220531_20220531_0320
https://archive.org/details/2_20220531_20220531_0325

51. Дополнительные материалы, индукции, линейная нагрузка, фактор нагрева.
https://archive.org/details/20250330_20250330_1839

52. Сведения по *кпд* и косинус *фи* зарубежных электродвигателей.
https://archive.org/details/abb–vemat–hoyer–koncar–n–cos

53. ГОСТ 54413–2011. Классы энергоэффективности односкоростных трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, нормативы *кпд*.
https://archive.org/details/54413–2011

54. Изоляционные материалы, справка. 2024.
https://archive.org/details/20240121_20240121_0504

55. Подсчет вероятного нагрева электродвигателя при номинальном режиме по температуре при испытании после ремонта на холостом ходу.
https://archive.org/details/20250213_20250213_2315

Если найденная книга не скачивается автоматически перейдите в меню справа: DOWNLOAD OPTIONS (опции скачивания), затем нажмите SHOW ALL (показать все), откроется страница с файлами имеющие различное расширение имени, выберете pdf или djvu, в зависимости от наличия.

Для просмотра скачанной литературы в формате djvu рекомендуемая программа для компьютера WinDjView

https://windjview.sourceforge.io/

Содержание

Если читатель заметил ошибки, опечатки или имеются какие либо иные замечания можно написать сообщение по электронной почте extender@post.com

Пособие вероятно в будущем будет дополняться, скачать можно здесь:

https://archive.org/details/20250415_20250415_0134

